

Туляков Юрий Михайлович – Волго-вятский филиал московского технического университета связи и информатики (МТУСИ); e-mail: yu.m.tulyakov@rambler.ru; 603006, Нижний Новгород, ул. Ошарская, 15, к. 15; тел.: 89107901111; директор; к.т.н.; доцент.

Рузанов Павел Александрович – e-mail: pavelr70@mail.ru; 603106, Нижний Новгород, ул. генерала Ивлиева, 8, кв. 61; тел.: 89027893288; кафедра математических и естественно-научных дисциплин; к.ф.-м.н.; доцент.

Tulyakov Yuri Mihaiylovich – Volga-Vyatka of Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI); e-mail: yu.m.tulyakov@rambler.ru; 15–15, Osharskaja street, N. Novgorod, 603006, Russia; phone: +79107901111; director; cand. of eng. sc.; associate professor.

Ruzanov Pavel Alexandrovich – e-mail: pavelr70@mail.ru; 8–61, general Ivliev street, Nizhny Novgorod, 603106, Russia; phone: +79027893288; the department of mathematics and natural sciences; cand. of phys.-math. sc.; associate professor.

УДК 621.396

О.А. Беляев, А.С. Рябоконт

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Во время разработки мобильных устройств разработчики сталкиваются с задачей выбора конкретных технических решений, при этом количество критериев, по которым производится оценка, тем выше, чем жестче требования к конечному продукту. Так выбор беспроводного модуля производится по критериям функциональности, удобства использования, энергопотребления, габаритов и конструктивных особенностей. Представлена методика оценки энергоэффективности различных беспроводных решений и приведен пример ее использования при выборе технологии беспроводной передачи данных для мобильного радиоэлектронного устройства. Трудность выбора заключается в том, что данных технической документации, предоставляемой производителем, не достаточно для адекватной оценки энергоэффективности и выбора того или иного беспроводного решения для конкретной задачи. Целью исследования является определение количественных показателей энергозатрат без макетирования с использованием дорогостоящих отладочных средств. Само понятие беспроводной технологии подразумевает не только особенности аппаратной реализации модуля или интегральной микросхемы трансивера, но и используемых протоколов передачи данных, свойства которых оказывают не меньшее влияние на результирующее энергопотребление проектируемого устройства. В существующих публикациях по данной тематике отсутствует комплексный подход к количественной оценке характеристик различных беспроводных технологий, который рассматривал бы каждое решение как совокупность аппаратных и программных средств. Предпринята попытка к формированию методики оценки энергоэффективности расчетным методом при минимальном наборе исходных данных, введены новые количественные показатели и проведена оценка с использованием этих показателей для различных вариантов организации персональной беспроводной сети на базе технологий Bluetooth и ANT. Полученные результаты были использованы в качестве критериев выбора беспроводного решения при проектировании комплекса кардиомониторирования и эргометрии на базе НТЦ «Техноцентр» ЮФУ.

Вычислительные платформы; беспроводные технологии; микроэлектроника; энергоэффективность.

A.O. Belyaev, A.S. Ryabokon

PARAMETRIC ANALYSIS OF WIRELESS TECHNOLOGY

During the development of mobile devices, developers are faced with the task of selecting the specific technical solutions, the number of criteria by which made the score, strongly depends on the requirements to the final product. So in the common case the choice of the wireless module

is made on the criteria of functionality, ease of use, energy consumption, dimensions and design features. The paper presents a technique for evaluating the energy efficiency of various wireless solutions, and is an example of its use when choosing a technology of wireless data transmission for mobile electronic devices. The difficulty of the choice lies in that the technical specifications provided by the manufacturer, is not enough to adequately assess the energy efficiency and the choice of a wireless solution for a specific task. The aim of the study is to determine the quantitative indicators of energy without costly prototyping using the debugging tools. The concept of wireless technology means not only the features of the hardware implementation of the transceiver module or integrated circuit, but and used data transfer protocols, properties of which have no less impact on the resulting power consumption of the designed device. In the existing literature on this subject does not contain comprehensive approach to quantify the characteristics of the various wireless technologies that would consider every solution as a set of hardware and software. The article attempts to form technique for assessing energy efficiency calculation method with a minimum set of baseline data, introduce new quantitative indicators and represents evaluation using these indicators for various personalized options for wireless networks based on Bluetooth and ANT. The results were used as criteria for selecting a wireless solution for the design of the complex cardiac and ergometry monitoring system in the South Federal University.

Computing platforms; wireless technologies; microelectronics; energy efficiency.

Введение. Активное развитие микроэлектроники с начала 2000-х годов, как в качественном, так и в количественном отношении предоставило широкую номенклатуру разнообразных решений для создания беспроводных сенсорных сетей [1, 2, 3]. При этом активно развиваются не только беспроводные технологии [4, 5], но и датчики [6]. В качестве основной тенденции этих направлений можно выделить интеграцию [7, 8, 9]. Так для беспроводных решений это заключается, во-первых, в увеличении сложности радиочастотного тракта, который помимо задач детектирования, модуляции/демодуляции сигналов фактически реализует протоколы физического, канального и сетевого уровней вплоть до аппаратного управления логическими каналами [10, 11]. Во-вторых, производители трансиверов [12] увеличивают интеграцию РЧ тракта и вычислительных средств в рамках единой вычислительной системы, таким образом, объединяя в одной интегральной схеме и РЧ тракт и вычислительную платформу, реализующую сетевые протоколы более высоких уровней и решающую, непосредственно, пользовательские задачи. Кроме того на рынок выходят новые интегральные микросхемы и модули [13, 14] включающие в себя дополнительные вычислительные ядра с дополнительными периферийными блоками обеспечивающие распределение задач между ядрами: стек протоколов и пользовательские приложения исполняются на ARM ядре, а задачи сбора измерительной информации – низкопотребляющими ядрами со специальным набором периферийных блоков.

Цели и задачи. Разнообразие представленных на рынке электроники компонентов и модулей для организации беспроводной передачи данных делает выбор конкретного решения для реализации в проекте нелегким. Часто используются решения, по работе с которыми уже есть опыт, или выбор производится исходя из данных технической документации и обзорного материала из различных источников. Негативным фактором является то, что заявленные значения параметров не всегда соответствуют действительности, если точнее, то эти значения действительны для конкретных режимов, которые на практике выполняются редко. Таким образом, необходимо сформулировать некоторый набор критериев, который бы позволял выполнять количественное сравнение различных беспроводных решений, при этом данные критерии должны соотноситься с реальными условиями функционирования.

Критерии оценки беспроводных решений. При сравнительном анализе различных беспроводных решений с точки зрения их энергоэффективности, общепринятых критериев сравнения, таких как скорость передачи данных, выходная

мощность передатчика, чувствительность приемника, протокол передачи данных и т.п., недостаточно, так как они в основном отражают лишь статические характеристики, и не позволяют оценить длительность работы конкретного беспроводного решения в определенных условиях при решении конкретной задачи. Поскольку при проектировании персональной беспроводной сети автономных устройств показатель энергоэффективности является одним из основных, то ему было уделено наибольшее внимание в настоящем исследовании. Особо важную роль расчет энергоэффективности играет при прогнозировании режимов работы устройств при питании от энергии получаемой извне [15], из электромагнитных полей, вибрации, разности температур и т.д. Частично задача оценки энергоэффективности решалась в работах Jin-Shyan Lee [16, 17] и Zhifang Wang [18], в данном исследовании полученные ими результаты дополнены, и с использованием сформулированных показателей выполнена экспериментальная оценка (по данным технической документации [19-25]) различных беспроводных решений.

Основным требованием к результату исследования является необходимость численной оценки энергоэффективности конкретного беспроводного решения по минимальному количеству параметров, или по некоторому интегральному показателю. С этой точки зрения, для оценки эффективности беспроводных трансиверов (как систем на кристалле, так и модулей) были введены новые показатели, описание которых представлено ниже.

Удельный информационный энергетический коэффициент передатчика (мДж/бит) – показывает количество энергии необходимое для передачи 1 бита полезной информации приходящееся на 1 милливатт выходной мощности. Данный вычисляемый параметр позволяет сравнивать эффективность различных беспроводных решений на уровне протоколов относительно потребляемой энергии, и вычисляется как:

$$P_{TX} = (D_k \cdot k_{\mathcal{E}})^{-1} \times P_{\sigma} \quad (1)$$

где D_K – канальная скорость передачи данных (бит/сек), $k_{\mathcal{E}}$ – коэффициент эффективности используемого протокола (отношение полезных данных к общему количеству данных в сообщении). Далее для указания канальной скорости будет использоваться размерность бит/сек, а для указания скорости передачи полезных данных – бод/сек, P_{σ} – удельная потребляемая мощность передатчика (в мВт) (3).

Удельный информационный энергетический коэффициент приемника (мДж/бит) – показывает количество энергии необходимое для приема 1 бита полезной информации:

$$P_{RX} = (D_k \cdot k_{\mathcal{E}})^{-1} \times (U \cdot I), \quad (2)$$

где D_K – канальная скорость передачи данных (бит/сек), $k_{\mathcal{E}}$ – коэффициент эффективности используемого протокола (отношение полезных данных к общему количеству данных в сообщении). Далее для указания канальной скорости будет использоваться размерность бит/сек, а для указания скорости передачи полезных данных – бод/сек, I – ток, потребляемый при приеме данных (в мА), U – напряжение питания приемника.

Удельная потребляемая мощность передатчика (мВт) – мощность потребленная передатчиком, приходящаяся на 1мВт выходной мощности.

$$P_{\sigma} = \frac{U \cdot I}{P}, \quad (3)$$

где I – ток, потребляемый при передаче данных (в мА), U – напряжение питания передатчика.

Энергоэффективность передатчика – отношение потребленной мощности к мощности излучения. Данный показатель позволяет сравнивать затраты энергии на обеспечение функционирования аппаратной части беспроводного решения, иными словами – какой процент потребленной мощности передается на выход радиопередатчика.

$$КПД = (p_{\sigma})^{-1} \times 100\%. \quad (4)$$

В исследовании участвуют следующие беспроводные решения:

- ◆ 8-Channel ANT™ RF Network Processor CC2571 (Texas Instruments);
- ◆ 8-Channel ANT™ SoC Solution nRF51422 (Nordic Semiconductor);
- ◆ 8-Channel ANT™ Chipset ANT11TR13 (Dynastream Innovations);
- ◆ Bluetooth® Low Energy and Proprietary SoC CC2541 (Texas Instruments);
- ◆ Bluetooth® Smart Ready Controller CC2564 (Texas Instruments);
- ◆ Bluetooth® Low Energy and 2.4 GHz Proprietary SoC 51822 (Nordic Semiconductor).
- ◆ STM32W108CC High-performance, IEEE 802.15.4 wireless SoC.

Далее будут приведены краткие характеристики и особенности каждого из рассматриваемых беспроводных решений и рассчитаны их интегральные показатели по выражениям (1) и (2).

Семейство процессоров беспроводной ANT сети CC2570 и CC2571 [19] реализуют ANT протокол и поддерживают 1 и 8 каналов соответственно. Подключение к основному процессору осуществляется посредством последовательного интерфейса (UART или SPI), а доступ осуществляется через API-функции (Application Programming Interface). В соответствии с стандартом протокола ANT хост-процессору необходимо реализовать только функции уровня представления и прикладного уровня. Характеристики CC2571 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры процессора беспроводной сети CC2571

Параметр	Значение	
Частотный диапазон	2,4 ГГц	
Физический уровень	-	
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)	1000	
Максимальная длина пакета (байт)	8	
Коэффициент эффективности используемого протокола	47%	
Чувствительность (наилучш.) (дБм)	-86	
Выходная мощность передатчика (дБм)	от -21 до +4	
Номинальное напряжение питания (В)	3,3	
Потребление	При приеме (мА)	23,7
	При передаче (0 дБм) (мА)	28,8
	При передаче (4 дБм) (мА)	34,3
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$1,98 \cdot 10^{-4}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$1,63 \cdot 10^{-4}$

nRF51422 является достаточно функциональной системой на кристалле (SoC – System on Chip) [20], построенной на базе архитектуры ARM Cortex-M0. Встроенный 2,4 ГГц трансивер поддерживает работу с протоколом ANT, а так же на канальном уровне совместим с трансиверами серий nRF24L и nRF24AP (Nordic Semiconductor) и может функционировать в специализированной беспроводной сети.

Так же nRF51422 имеет разветвленный набор аналоговой и цифровой периферии, которая может функционировать без участия ЦПУ под управлением программируемого периферийного интерфейса (PPI – Programmable Peripheral Interface). Возможность гибкой настройки назначения линий ввода/вывода позволяет использовать их в качестве линий интерфейсов, выводов ШИМ и входов квадратного демодулятора.

nRF51422 поддерживает встраиваемый стек ANT протокола S210 (Dynastream Innovations), а так же стеки других протоколов, включая Gazell (Nordic Semiconductor) которые доступны в соответствующей системе разработки ПО (SDK – Software Development Kit). Характеристики nRF51422 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры СнК nRF51422

Параметр	Значение	
Частотный диапазон	2,4 ГГц	
Физический уровень	-	
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)	250/1000/2000	
Максимальная длина пакета (байт)	8	
коэффициент эффективности используемого протокола	47%	
Чувствительность (наилучш.) (дБм)	-96/-90/-85	
Выходная мощность передатчика (дБм)	от -20 до +4	
Номинальное напряжение питания (В)	от 1,8 до 3,3	
Потребление	При приеме (мА)	9,5
	При передаче (-4 дБм) (мА)	6,3
	При передаче (0 дБм) (мА)	8,1
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$2,78 \cdot 10^{-5}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$3,26 \cdot 10^{-5}$

ANT11TR13 – 8-и канальный ANT™ чипсет. Данный набор микросхем относится к семейству AT3 ANT чипсетов общего назначения [21]. Каждый из чипсетов представляет собой пару интегральных микросхем:

- ◆ MSP430F2252 – низкопотребляющий микроконтроллер (беспроводной процессор), производства Texas Instruments.
- ◆ nRF24L01+ – низкопотребляющий трансивер, производства Nordic Semiconductor.

На базе микроконтроллера MSP430F2252 реализован контроллер беспроводной сети ANT, со встроенным стеком протокола. Для доступа к среде передачи данных используется трансивер 2,4 ГГц nRF24L01+. Отличительной особенностью данного семейства чипсетов является наличие встроенной платформы SensRcore™, которая позволяет сконфигурировать чипсет таким образом, что он будет осуществлять прием и передачу сигнала аналоговых и цифровых датчиков используя ANT протокол без участия хост-процессора. Характеристики ANT11TR13 приведены в табл. 3.

CC2541 является оптимизированной по энергопотреблению системой на кристалле [22] предназначенной для построения беспроводных решений поддерживающих Bluetooth low energy, а так же с использованием различных проприетарных протоколов для диапазона 2,4 ГГц. Данная СнК объединяет в себе РЧ трансивер стандартное вычислительное ядро 8051 с 256 кБ встроенного ПЗУ (Flash) и 8 кБ ОЗУ. Отличительными особенностями вычислительного ядра является его специализация на низкое энергопотребление.

Таблица 3

Параметры чипсета ANT11TR13

Параметр	Значение	
Частотный диапазон	2,4 ГГц	
Физический уровень	-	
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)	1000	
Максимальная длина пакета (байт)	8	
+Коэффициент эффективности используемого протокола	47%	
Чувствительность (наилучш.) (дБм)	-85	
Выходная мощность передатчика (дБм)	от -20 до +4	
Номинальное напряжение питания (В)	от 2,2 до 3,6	
Потребление	При приеме (мА)	12
	При передаче (0 дБм) (мА)	11,3
	При передаче (-20 дБм) (мА)	7
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$7,75 \cdot 10^{-5}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$8,23 \cdot 10^{-5}$

При использовании проприетарных протоколов канальная скорость может достигать 2 Мбит/сек. Так же РЧ-ядро предоставляет расширенные функции по baseband-автоматизации, включающие автоматическое квитирование и декодирование адреса. Характеристики CC2541 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры чипсета CC2541

Параметр	Значение	
Частотный диапазон	2,4 ГГц	
Физический уровень	IEEE 802.15.1	
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)	2000	
Максимальная длина пакета (байт)	339	
Коэффициент эффективности используемого протокола	94%	
Чувствительность (наилучш.) (дБм)	-94	
Выходная мощность передатчика (дБм)	от -20 до 0	
Номинальное напряжение питания (В)	от 2,2 до 3,6	
Потребление	При приеме (мА)	17,9
	При передаче (0 дБм) (мА)	18,2
	При передаче (-20 дБм) (мА)	16,8
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$4,31 \cdot 10^{-5}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$4,24 \cdot 10^{-5}$

Согласно классификации Bluetooth SIG CC2564 [23] является контроллером Bluetooth Smart Ready с HCI (Host Controller Interface) интерфейсом (т.е. требует дополнительного контроллера, в котором реализован стек протоколов Bluetooth). Данный контроллер позволяет взаимодействовать устройствам Bluetooth Smart и другим устройствам, поддерживающим Bluetooth и по сути может служить концентратором беспроводной сети. CC2564 представляет собой законченное решение поддерживающее следующие технологии:

- ◆ стандартная скорость передачи данных (BR, Basic rate);
- ◆ повышенная скорость передачи данных (EDR, Enhanced Data Rate);
- ◆ низкое потребление (LE, Low Energy).

В отличие от других рассматриваемых Bluetooth решений, контроллер CC2564 не является системой на кристалле и для его функционирования требуется дополнительный контроллер (хост), в котором реализован стек протоколов Bluetooth. Производителем (Texas Instruments) предоставляется стек протоколов, портированный на платформы MSP430 и Stellaris, распространяемый под лицензией Royalty Free, так же может быть использован стек протоколов Stonestreet One, портированный на различные аппаратные платформы и ОС. Характеристики CC2564 приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры чипсета CC2564

Параметр		Значение
Частотный диапазон		2,4 ГГц
Физический уровень		IEEE 802.15.1
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)		1000
Максимальная длина пакета (байт)		339
Коэффициент эффективности используемого протокола		94%
Чувствительность (наилучш.) (дБм)		-95
Выходная мощность передатчика (дБм)		до +12
Номинальное напряжение питания (В)		от 2,2 до 4,8
Потребление	При приеме (мА)	12
	При передаче (4 дБм) (мА)	12
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$2,27 \cdot 10^{-4}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$5,69 \cdot 10^{-4}$

Nordic Semiconductor nRF51822 [24] является системой на кристалле, состоящей из РЧ-части и вычислительного ядра ARM Cortex-M0 с 256 кБ ПЗУ и 16 кБ ОЗУ. РЧ-трансивер на канальном совместим с дискретными трансиверами nRF24L Nordic Semiconductor. В nRF51822 может быть реализован стек протоколов Bluetooth, а так же другие проприетарные протоколы.

Производителем предоставляется стек протоколов Bluetooth low energy S110 в форме прекомпилированной библиотеки под лицензией royalty-free. Характеристики nRF51822 приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры чипсета nRF51822

Параметр		Значение
Частотный диапазон		2,4 ГГц
Физический уровень		IEEE 802.15.1
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)		2000
Максимальная длина пакета (байт)		339
Коэффициент эффективности используемого протокола		694%
Чувствительность (наилучш.) (дБм)		-92,5
Выходная мощность передатчика (дБм)		от -20 до +4
Номинальное напряжение питания (В)		от 1,8 до 3,6
Потребление	При приеме (мА)	9,5
	При передаче (0 дБм) (мА)	8,1
	При передаче (-4 дБм) (мА)	6,3
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$1,92 \cdot 10^{-5}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$2,25 \cdot 10^{-5}$

STM32W108CC [25] интегрированная система на кристалле включающая в себя РЧ трансивер стандарта IEEE 802.15.4-2003, 32-х разрядное ядро ARM Cortex-M3, ПЗУ, ОЗУ и стандартный набор периферийных модулей. Архитектура РЧ части построена таким образом, чтобы минимизировать количество внешних компонентов. Некоторые функции MAC уровня реализованы аппаратно: автоматическое квитирование, формирование автоматической задержки, оценку состояния канала при передаче, а так же автоматическую фильтрацию принятых пакетов. Так же в MAC уровень интегрирован интерфейс трассировки пакетов, позволяющий захватывать все пакеты без фильтрации по адресам. В данной СнК реализованы расширенные возможности по энергосбережению. Различные режимы «глубокого сна» позволяют обеспечить потребление вычислительной части на уровне 1 мкА при сохранении содержимого ОЗУ. Характеристики STM32W108CC приведены в табл. 7.

Таблица 7

Параметры СнК STM32W108CC

Параметр	Значение	
Частотный диапазон	2,4 ГГц	
Физический уровень	IEEE 802.15.4	
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/сек)	250	
Максимальная длина пакета (байт)	102	
Коэффициент эффективности используемого протокола	76%	
Чувствительность (наилучш.) (дБм)	-102	
Выходная мощность передатчика (дБм)	от -55 до +8	
Номинальное напряжение питания (В)	от 2,1 до 3,6	
Потребление	При приеме (мА)	22
	При передаче (+3 дБм) (мА)	26
Показатели	P_{TX} (мДж/бит)	$2,21 \cdot 10^{-4}$
	P_{RX} (мДж/бит)	$3,73 \cdot 10^{-4}$

На основании рассчитанных по выражениям (1) и (2) показателей сформирован график (рис. 1) сравнительной энергоэффективности различных беспроводных решений при передаче (TX) и приеме (RX).

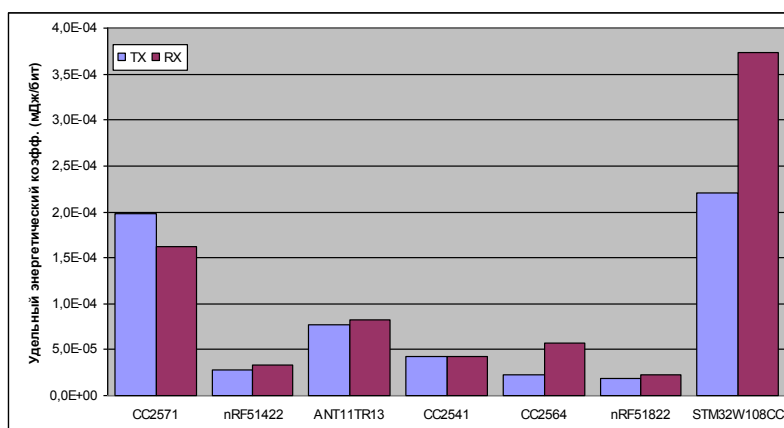


Рис. 1. Значения удельного энергетического коэффициента различных беспроводных решений

Из графика видно, что наиболее эффективными являются решения от Nordic Semiconductor – СнК nRF51422 (ANT) и nRF51822 (Bluetooth Low Energy), второе место занимают решения от Texas Instruments – CC2541 и CC2564 (Bluetooth). При выборе стоит учитывать, что помимо показателей по энергоэффективности СнК стоит рассматривать так же и производительность вычислительной платформы на кристалле (что в данном исследовании не учитывалось), таким образом, при оценке применимости различных решений в конкретной задаче анализ будет более информативным.

В результате была получена методика количественного параметрического анализа беспроводных технологий с точки зрения их энергоэффективности. В качестве ключевого критерия предложен удельный энергетический коэффициент, характеризующий количество энергии, затраченное для передачи или приема одной единицы информации. Данная оценка особенно актуальна при анализе стеков протоколов, так как каждый из уровней, начиная с канального, обрамляет полезную информацию служебными данными, обеспечивающими функционирование протокола, но тем самым снижая «информативность» передаваемого сообщения. Описанные беспроводные решения и расчеты были сипользованы при выборе беспроводной технологии передачи данных для организации персональной беспроводной сети многофункционального комплекса кардиомониторирования и эргометрии. На основании анализа был выбрано решение на базе CC2541, при этом в качестве дополнительных критериев были выбраны доступность и документированность СнК.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению мобильного многофункционального аппаратно-программного комплекса длительного кардиомониторирования и эргометрии" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010г. Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ник Ван Дирдонк*. Сетевые стандарты беспроводных сетей с малым энергопотреблением // *Электронные компоненты*. – 2009. – № 3. URL: www.russianelectronics.ru/development/review/2191/doc/43290/ (дата обращения 2.04.2015).
2. *Гайкович Г., Гайкович М.* Беспроводные технологии и их применение в промышленности. Вопросы энергосбережения и выбора батарей // *Электронные компоненты*. – 2011. – № 10. URL: www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/57502/ (дата обращения 2.04.2015).
3. Беспроводной промышленный мониторинг. Интеллектуальные системы на базе сенсорных сетей // *Институт точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН*. URL: www.ipmce.ru/img/release/is_sensor.pdf (дата обращения 2.04.2015).
4. *Колыбельников А.И.* Обзор технологий беспроводных сетей // *Труды МФТИ*. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 3-29.
5. *Резник В.А.* Инновации в мире беспроводных технологий: промышленный стандарт ISA100.11a // *Автоматизация в промышленности*. – 2011. – № 6. – С. 21-26.
6. *Адамов Ю.Ф., Сибгатуллин А.Г., Сомов О.А.* Тенденции развития сенсорных систем и интеллектуальных датчиков // *Датчики и системы*. – 2011. – № 5. – С. 58-59.
7. RF-IC Trends for Wireless Embedded Sensor Networks RF-IC Trends for Wireless Embedded Sensor Networks // *Chipcon*. URL: webs.cs.berkeley.edu/retreat-6-04/RF-IC%20Trends%20for%20Wireless%20Embedded%20Sensor%20Networks%20-%20Chipcon.pdf (дата обращения 2.04.2015).
8. RF Front End Application and Technology Trends // *Philips*. URL: www.eet.bme.hu/~benedek/CAD_Methodology/Tutorials/iccad2003/6_2slides.pdf (дата обращения 2.04.2015).
9. *Theodore Varelas*. An overview of the trends and the challenges in RFIC Integration // *Theta Microelectronics*. URL: <http://dsmc.eap.gr/ppts/varelaspres.pdf> (дата обращения 2.04.2015).

10. nRF24LE1. 2.4 GHz RF System-on-Chip with flash // Nordic Semiconductor. URL: www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LE1 (дата обращения 2.04.2015).
11. MSP430 SoC With RF Core // Texas Instruments. URL: www.ti.com/lit/ds/slas554h/slas554h.pdf (дата обращения 2.04.2015).
12. CC2650. SimpleLink multi-standard 2.4 GHz ultra-low power wireless MCU. URL: www.ti.com/product/cc2650 (дата обращения 2.04.2015).
13. BLE112 Bluetooth Smart Module // Bluegiga. A Silicon Labs Company. URL: www.bluegiga.com/en-US/products/ble112-bluetooth-smart-module/ (дата обращения 2.04.2015).
14. BlueMod+SR. Bluetooth Smart Ready Module // Stallman. URL: www.stollmann.de/en/modules/bluetooth-modules/bluemod-sr.html (дата обращения 2.04.2015).
15. Синютин Е.С. Новые интегральные решения для разработки сборщиков энергии из окружающей среды // Инженерный вестник Дона. – № 4. – URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2714 (дата обращения 2.04.2015).
16. Jin-Shyan Lee., Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi // The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). – Электрон. журн. – Taipei, Taiwan: 2007. – URL: eee.guc.edu.tw/announcements/comparative_wireless_standards.pdf, свободный. – Электрон. версия печ. публикации (дата обращения 27.03.2015).
17. Jin-Shyan Lee. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2006. – Vol. 52, № 3. – P. 742-749.
18. Zhifang Wang, Robert J. Thomas, Zygmunt J. Haas Performance comparison of Bluetooth scatternet formation protocols for multi-hop networks // Wireless Networks. – 2009. – Vol. 15, № 2. – P. 209-226.
19. CC2571. (ACTIVE) 8-channel ANT™ RF Network Processors // Texas Instruments Incorporated. – Тех. документ. – Dallas, USA, 2015. – URL: www.ti.com/product/cc2571 (дата обращения 2.04.2015).
20. nRF51422 ANT SoC, Active // Nordic Semiconductor ASA – Тех. документ. – Oslo, Norway, 2015. – URL: www.nordicsemi.com/eng/Products/ANT/nRF51422 (дата обращения 2.04.2015).
21. AT3 RF Transceiver Chipset // Dynastream Innovations Inc. – Тех. документ. – Cochrane, Canada, 2015. – URL: www.thisisant.com/assets/resources/Datasheets/D00001134_AT3_RF_Transceiver_Chipset_Datasheet_Rev_1.4.pdf (дата обращения 2.04.2015).
22. CC2541 (ACTIVE) 2.4 GHz Bluetooth® low energy and Proprietary System-on-Chip (Rev. C) // Texas Instruments Incorporated. – Тех. документ. – Dallas, USA, 2015. – URL: www.ti.com/product/cc2541 (дата обращения 2.04.2015).
23. CC2564 (ACTIVE) Bluetooth Smart Ready Controller // Texas Instruments Incorporated. – Тех. документ. – Dallas, USA, 2015. – URL: www.ti.com/product/cc2564, свободный (дата обращения 2.04.2015).
24. nRF51822 Bluetooth low energy and 4.4 GHz proprietary SoC, Active // Nordic Semiconductor ASA. – Тех. документ. – Oslo, Norway, 2015. – URL: www.nordicsemi.com/eng/Products/ANT/nRF51822 (дата обращения 2.04.2015).
25. STM32W108CC High-performance, IEEE 802.15.4 wireless system-on-chip with 256-Kbyte Flash, QFN48, Active // STMicroelectronics. – Тех. документ. – Geneva, Switzerland, 2015. – URL: www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1581/PF251886 (дата обращения 2.04.2015).

REFERENCES

1. Nik Van Dirdonk. Setevye standarty besprovodnykh setey s malym energopotrebleniem [Network standards wireless networks, low power], *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2009, No. 3. Available at: www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2191/doc/43290/ (Accessed 2 April 2015).
2. Gaykovich G., Gaykovich M. Besprovodnye tekhnologii i ikh primeneniye v promyshlennosti. Voprosy energosberezheniya i vybora batarey [Wireless technologies and their application in industry. The issues of energy saving and the choice of batteries], *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2011, No. 10. Available at: www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/57502/ (Accessed 2 April 2015).

3. Беспроводной промышленный мониторинг. Интеллектуальные системы на базе сенсорных сетей [Wireless industrial monitoring. Intelligent systems based on sensor networks], *Institut tochnoy mekhaniki i vychislitel'noy tekhniki im. S.A. Lebedeva RAN* [Institute of precision mechanics and computer engineering. S.A. Lebedev of RAS]. Available at: www.ipmce.ru/img/release/is_sensor.pdf (Accessed 2 April 2015).
4. *Kolybel'nikov A.I.* Обзор технологий беспроводных сетей [Overview of wireless network technologies], *Trudy MFTI* [Proceedings of MIPT], 2012, Vol. 4, No. 2, pp. 3-29.
5. *Reznik V.A.* Innovatsii v mire besprovodnykh tekhnologii: promyshlennyy standart ISA100.11a [Innovations in the world of wireless technologies: industrial standard ISA100.11a], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2011, No. 6, pp. 21-26.
6. *Adamov Yu.F., Sibagatullin A.G., Somov O.A.* Tendentsii razvitiya sensornykh sistem i intellektual'nykh datchikov [Trends in the development of sensor systems and smart sensors], *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2011, No. 5, pp. 58-59.
7. RF-IC Trends for Wireless Embedded Sensor Networks RF-IC Trends for Wireless Embedded Sensor Networks, *Chipcon*. Available at: webs.cs.berkeley.edu/retreat-6-04/RF-IC%20Trends%20for%20Wireless%20Embedded%20Sensor%20Networks%20-%20Chipcon.pdf (Accessed 2 April 2015).
8. RF Front End Application and Technology Trends, *Philips*. Available at: www.eet.bme.hu/~benedek/CAD_Methodology/Tutorials/iccad2003/6_2slides.pdf (Accessed 2 April 2015).
9. *Theodore Varelas.* An overview of the trends and the challenges in RFIC Integration, *Theta Microelectronics*. Available at: <http://dsmc.eap.gr/ppts/varelaspres.pdf> (Accessed 2 April 2015).
10. nRF24LE1. 2.4 GHz RF System-on-Chip with flash, *Nordic Semiconductor*. Available at: www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LE1 (Accessed 2 April 2015).
11. MSP430 SoC With RF Core, *Texas Instruments*. Available at: www.ti.com/lit/ds/slas554h/slas554h.pdf (Accessed 2 April 2015).
12. CC2650. SimpleLink multi-standard 2.4 GHz ultra-low power wireless MCU. Available at: www.ti.com/product/cc2650 (Accessed 2 April 2015).
13. BLE112 Bluetooth Smart Module, *Bluegiga. A Silicon Labs Company*. Available at: www.bluegiga.com/en-US/products/ble112-bluetooth-smart-module/ (Accessed 2 April 2015).
14. BlueMod+SR. Bluetooth Smart Ready Module, *Stallman*. Available at: www.stollmann.de/en/modules/bluetooth-modules/bluemod-sr.html (Accessed 2 April 2015).
15. *Sinyutin E.S.* Novye integral'nye resheniya dlya razrabotki sborshchikov energii iz okruzhayushchey sredy [New integrated solutions for the development of energy collectors from the environment], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], № 4. Available at: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2714 (Accessed 2 April 2015).
16. *Jin-Shyan Lee., Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen.* A Comparitive Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. Taipei, Taiwan: 2007. Available at: eee.guc.edu.eg/announcements/comparaitive_wireless_standards.pdf, свободный. (Accessed 27 March 2015).
17. *Jin-Shyan Lee.* Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2006, Vol. 52, No. 3, pp. 742-749.
18. *Zhifang Wang, Robert J. Thomas, Zygmunt J. Haas* Performance comparison of Bluetooth scatternet formation protocols for multi-hop networks, *Wireless Networks*, 2009, Vol. 15, No. 2, pp. 209-226.
19. CC2571. (ACTIVE) 8-channel ANTTM RF Network Processors, *Texas Instruments Incorporated*. Technical document. Dallas, USA, 2015. Available at: www.ti.com/product/cc2571 (Accessed 2 April 2015).
20. nRF51422 ANT SoC, Active // Nordic Semiconductor ASA. Technical document. Oslo, Norway, 2015. Available at: www.nordicsemi.com/eng/Products/ANT/nRF51422 (Accessed 2 April 2015).
21. AT3 RF Transeiver Chipset. *Dynastream Innovations Inc.* Technical document. Cochrane, Canada, 2015. Available at: www.thisisant.com/assets/resources/Datasheets/D00001134_AT3_RF_Transceiver_Chipset_Datasheet_Rev_1.4.pdf (Accessed 2 April 2015).
22. CC2541 (ACTIVE) 2.4 GHz Bluetooth® low energy and Proprietary System-on-Chip (Rev. C). *Texas Instruments Incorporated*. Technical document. Dallas, USA, 2015. Available at: www.ti.com/product/cc2541 (Accessed 2 April 2015).

23. CC2564 (ACTIVE) Bluetooth Smart Ready Controller. *Texas Instruments Incorporated* Technical document. Dallas, USA, 2015. Available at: www.ti.com/product/cc2564, свободный (Accessed 2 April 2015).
24. nRF51822 Bluetooth low energy and 4.4 GHz proprietary SoC, Active, *Nordic Semiconductor ASA*. Technical document. Oslo, Norway, 2015. Available at: www.nordicsemi.com/eng/Products/ANT/nRF51822 (Accessed 2 April 2015).
25. STM32W108CC High-performance, IEEE 802.15.4 wireless system-on-chip with 256-Kbyte Flash, QFN48, Active. *STMicroelectronics*. Technical document. Geneva, Switzerland, 2015. Available at: www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1581/PF251886 (Accessed 2 April 2015).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Соколов.

Беляев Алексей Олегович – Научно-технический центр «Техноцентр» ЮФУ; e-mail: alexysob@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: +78634311143; к.т.н.; начальник сектора.

Рябокоть Александр Сергеевич – e-mail: chiptagan@mail.ru; к.т.н.; младший научный сотрудник.

Belyaev Alexey Olegovich – Scientific and Technical Center "Technocenter" Southern Federal University; e-mail: alexysob@gmail.com; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634311143; cand. of eng. sc.; team leader.

Ryabokon Alexander Sergeevich – e-mail: chiptagan@mail.ru; cand. of eng. sc.; junior researcher.