

Энергосбережение в сверхширокополосных беспроводных приемопередатчиках и сенсорных сетях

Е.В. Ефремова, В.А. Лазарев, Т.И. Мохсени

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, ул. Моховая, 11/7, chaos@cplire.ru

В работе рассматриваются вопросы обеспечения энергосбережения в прямохаотических приемопередатчиках, предназначенных для использования в беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетях. Предлагаются возможные пути снижения энергопотребления приемопередатчиков для обеспечения более продолжительной автономной работы: конструктивные решения, позволяющие использовать малопотребляющие электронные компоненты, организация протоколов связи, снижающих нагрузку на устройства, введение спящих режимов.

In the paper energy saving in direct chaotic transceivers meant for using in wireless ultrawideband sensor networks is investigated. Some ways of energy saving to provide long autonomous operation period of the transmitters are proposed: design solutions, using low consumption elements, communication protocol organization and using of sleep modes.

Введение

Сенсорные сети это достаточно новое, быстро развивающееся направление современных телекоммуникаций. Это системы, основной функцией которых является сбор данных с распределенных в пространстве датчиков и доставка полученной информации к точке сбора данных (базовой станции). Область применения таких систем весьма обширна – это измерение параметров окружающей среды (температура, влажность), мониторинг несущих конструкций зданий, системы сбора показаний с датчиков на теле пациента в медицине и др. Ключевыми характеристиками сенсорной сети являются:

Низкое энергопотребление – возможность работы от батареи или аккумулятора.

Длительное время жизни сети без замены узлов сети или элементов питания.

Небольшой поток данных, передаваемых от каждого узла сети.

Необходимость обеспечения длительной автономной работы беспроводных портативных устройств является проблемой, определяющей жизнеспособность, область применения и конкурентоспособность беспроводных технологий и устройств на их основе [1, 2]. Для решения вопросов энергопотребления и энергосбережения могут использоваться различные подходы: конструктивные решения, позволяющие использовать малопотребляющие компоненты, организация протоколов связи, снижающих нагрузку на устройства, введение спящих режимов и др.

В данной работе проводится анализ энергопотребления сверхширокополосных приемопередающих устройств и поиск путей его снижения.

Принцип действия СШП прямохаотических приемопередатчиков, их структура и характеристики рассмотрены в работах [3-9]. К настоящему времени разработано несколько типов СШП прямохаотических приемопередатчиков, физический уровень которых удовлетворяет стандарту IEEE 802.15.4a [10] в части касающейся использования хаотических импульсов в качестве носителей информации.

2. Структура энергопотребления приемопередатчика

Блок-схема энергопотребления приемопередатчика показана на рис. 1 и включает в себя микроконтроллер (МК), ПЛИС, передатчик, приемник, кварцевый генератор, компаратор, ЦАП, стабилизатор и источник питания (батареи). В процессе

функционирования приемопередатчик постоянно потребляет электроэнергию. Величина потребления является функцией времени, которая зависит от характеристик энергопотребления отдельных элементов приемопередатчика, включая выбранные режимы и условия их работы, и от состава элементов приемопередатчика, активных на различных временных интервалах.

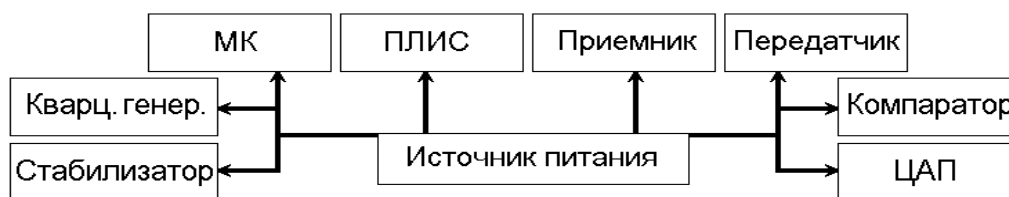


Рис. 1. Блок-схема энергопотребления приемопередатчика.

Например, разные типы микроконтроллеров имеют разные уровни потребления мощности. Кроме того, мощность, потребляемая микроконтроллером, зависит от его загрузки и тактовой частоты, на которой он работает в приемопередатчике.

Мощность, потребляемая передатчиком и приемником, также зависит от объемов передаваемой в единицу времени информации.

Рассмотрим энергопотребление предлагаемых к реализации устройств и возможные пути его снижения для обеспечения более продолжительной автономной работы.

3. Функционирование приемопередатчика в режиме ретрансляции

Основные рабочие режимы функционирования узлов СШП коммуникационной сети – это режим передачи потока данных по беспроводному каналу, режим ретрансляции сигнала и всевозможные спящие режимы, если никакие потоки данных в данный момент не передаются. Кроме того, время от времени передается служебная информация – управляющие команды, но считаем, что эти процессы занимают значительно меньше времени по сравнению с основными режимами.

Для того чтобы проанализировать энергопотребление устройства, начнем с ретрансляции пакетов, поскольку это наиболее сложный режим, при котором задействованы все блоки устройства. Рассмотрим цикл ретрансляции одного пакета данных.

В цикле ретрансляции пакета данных можно выделить четыре основных этапа: прием пакета, обработка пакета, передача пакета, режим «ожидания». Здесь под режимом «ожидания» подразумевается пауза между двумя ретрансляциями последовательно идущих пакетов.



Рис. 2. Этапы цикла ретрансляции пакета.

4. Энергопотребление приемопередатчика в режиме ретрансляции в отсутствие энергосбережения

В качестве отправной точки рассмотрим энергопотребление приемопередатчика, в котором не предусмотрены режимы энергосбережения. В приемопередатчике существует только три возможных состояния: прием, обработка пакета, передача. В паузах между пакетами приемопередатчик слушает эфир, т.е. находится в режиме приема.

На каждом этапе ретрансляции пакета блоки приемопередатчика работают по-разному в зависимости от выполняемых ими на данном этапе функций и заданного сценария их работы. Сценарий работы блоков приемопередатчика заложен в программу, выполняемую микроконтроллером, который управляет сменами режимов отдельных блоков приемопередатчика.

В качестве примера рассмотрим энергопотребление СШП прямохаотического приемопередатчика ППС-40А [7-9]. Это устройство, работающее в диапазоне частот 3-5 ГГц, Физическая скорость передачи данных 6 Мбит/с, излучаемая мощность на этой скорости -1 дБм, Дальность передачи 20-25 м. Это одна из первых версий прямохаотических приемопередатчиков, используемых в сенсорных сетях. В этом приемопередатчике не предусмотрены режимы энергосбережения.

В рассматриваемом устройстве генератор включается только для передачи данных, при этом в непрерывном режиме он потребляет ток 70 мА. Для передачи отдельных битов генератор модулируется по питанию, т.е. включается и выключается. При этом время включения-выключения генератора мало (~ 1-2 нс). За счет такой модуляции среднее потребление генератора уменьшается пропорционально скважности следования импульсов. На этапах приема и обработки пакета и в паузе между пакетами генератор полностью отключается и его потребление равно 0 мА.

Приемник отключается на время обработки и передачи пакета (потребляемый ток 0 мА). Все остальное время приемник находится в рабочем режиме, ожидая прихода пакета данных, потребляя при этом ток 41 мА. Время отключения приемника 160 нс, время включения – 16 мкс.

ПЛИС включен постоянно и потребляет «холостом режиме» 2 мА, однако в зависимости от действий, которые он производит на различные этапах цикла приема-передачи пакета его потребление возрастает до 10 мА. Переключение между режимами происходит быстро.

Остальные блоки устройства, такие как контроллер, кварцевый осциллятор, компаратор, ЦАП и стабилизатор работают постоянно, потребляя при этом ток 8.2 мА, 7.4 мА, 7.4 мА, 0.2 мА, 0.5 мА соответственно.

Время обработки пакета считается равным 20 мкс.

В таблице 1 приведены средние значения потребления тока устройством во время приема пакета, передачи пакета, в паузе между пакетами и общее потребление устройства из расчета, что передаются пакеты длиной 170 байт со скоростью 64 кбит/с. Предполагается, что устройство работает в этом режиме 100% времени.

Таблица 1.

Потребление приемопередатчика	Среднее, мА
На этапе приема	0.97
На этапе передачи	0.53
При ретрансляции (прием+обработка+передача)	1.53
На этапе ожидания (в паузах между пакетами)	72.7
Общее	74.2

Среднее потребление энергии при такой скорости передачи равно 74 мА или 245 мВт. Если устройство будет непрерывно работать в режиме ретрансляции на такой скорости, то оно сможет работать от стандартной батарейки емкостью 1.2 Ач (2.4 Ач) в течение 16 (32) часов.

Полученные характеристики позволяют обеспечить функционирование приемопередатчиков в течение нескольких лет, при использовании их в приложениях, в которых информация от сенсорных блоков передается редко, например раз в месяц и

объем передаваемых данных невелик. Однако если речь идет о приложениях, в которых поток данных от датчиков достаточно интенсивный, для обеспечения долговременной работы сети без замены источников питания энергопотребление приемопередатчиков должно быть значительно уменьшено.

На рис. 3 представлена общая картина потребления энергии приемопередатчиком. Оттенками серого показано потребление отдельных блоков. Потребление блоков сгруппировано по этапам цикла ретрансляции.

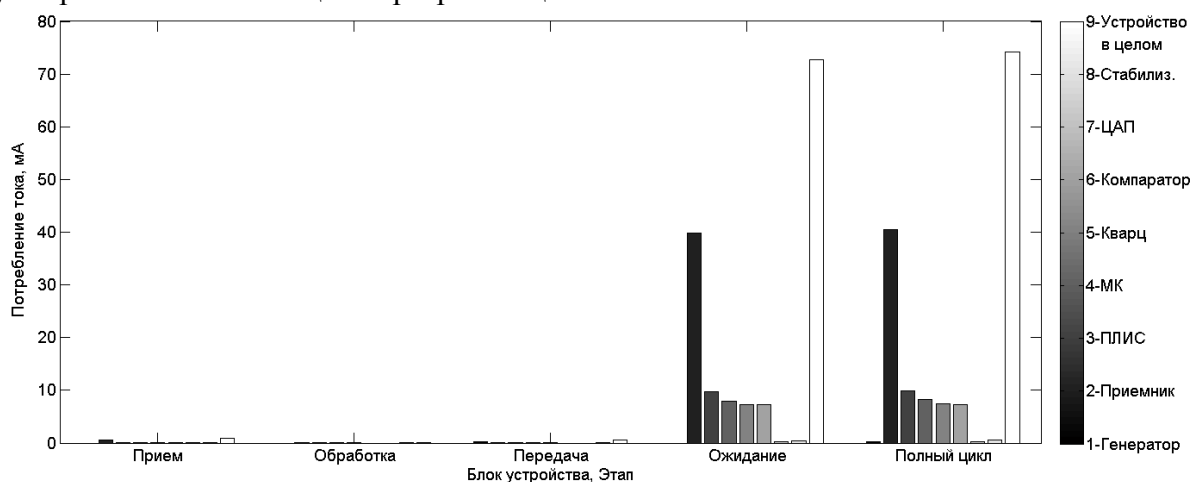


Рис. 3. Потребление блоков устройства на различных этапах цикла ретрансляции пакетов.

Как показывает анализ рисунков, основное потребление устройства приходится на этап ожидания, при этом блоком, потребляющим наибольший ток, является приемник. Это объясняется тем, что приемник сам по себе потребляющий в активном режиме достаточно большой ток, по сравнению с другими блоками, работает практически постоянно, отключаясь лишь на короткий интервал времени. Другие блоки устройства (за исключением генератора) так же работают постоянно, внося свой вклад в общее потребление.

Для того чтобы снизить энергопотребление приемопередатчика необходимо оптимизировать функционирование его блоков. Для этого будут использованы одновременно два подхода: выбор блоков устройства с более низким потреблением и организация режимов функционирования блоков устройства.

5. Энергопотребление приемопередатчика в режиме ретрансляции с энергосбережением

На первом этапе мы попытались снизить энергопотребление приемопередатчика за счет более рациональной организации работы отдельных блоков. Если в исходной схеме большая часть блоков работает непрерывно на протяжении всего цикла ретрансляции пакета, то в новом варианте предлагается там, где возможно, отключать не задействованные на том или ином этапе блоки или переводить их в режимы с пониженным энергопотреблением («спящие режимы») и возвращать их в активный режим непосредственно к тому моменту, когда они должны быть задействованы для выполнения каких-либо функций.

Например, если в системе связи предусмотрена синхронизация между устройствами, и приемопередатчик имеет информацию об ожидаемом времени прихода следующего пакета, который он должен принять, то приемник может не прослушивать эфир постоянно, а включаться только к определенному моменту времени. Компаратор и ЦАП задействованы только во время приема пакета, после того, как пакет принят, их можно отключить и включить снова к моменту приема следующего пакета.

Микроконтроллер активно работает во время приема, обработки и передачи пакета, а на этапе ожидания он может быть переведен в «спящий» режим. Кварцевый генератор ПЛИС может быть отключен на время ожидания следующего пакета. Однако необходимо вернуть микроконтроллер и кварцевый генератор ПЛИС в активный режим к моменту прихода следующего пакета.

Временная диаграмма функционирования блоков приемопередатчика по такому варианту приведена на рис. 4.

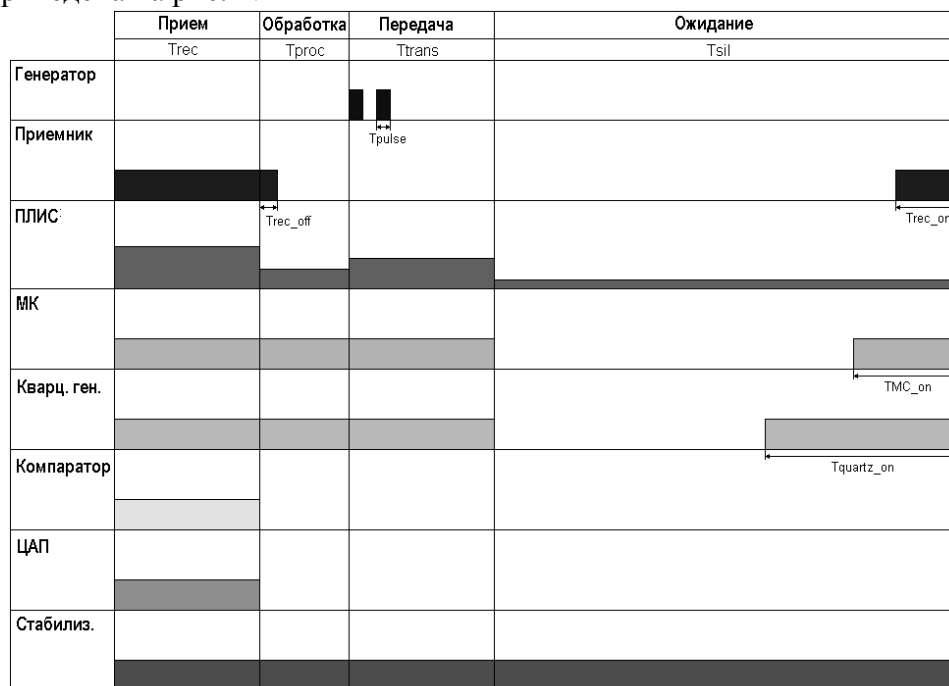


Рис.4. Диаграмма функционирования блоков приемопередатчика в цикле ретрансляции пакета данных.

Генератор включается только для передачи данных, при этом в непрерывном режиме он, как и прежде, потребляет ток 60 мА. Для передачи отдельных битов генератор модулируется по питанию, т.е. включается и выключается. При этом время включения-выключения генератора мало (~ 1-2 нс). Уменьшение энергопотребления за счет скважности следования радиоимпульсов в таблице не приведены, они учитываются далее при расчете энергопотребления устройства и его блоков. На этапах приема и обработки пакета и в паузе между пакетами генератор полностью отключается и его потребление равно 0 мА.

Приемник работает только во время приема пакета, потребляя при этом ток 41 мА. На время обработки, передачи пакета и в паузе между пакетами приемник отключен (потребляемый ток 0 мА). Однако во время отключения приемника (160 нс) на этапе обработки пакета и во время включения приемника (16 мкс) для приема следующего пакета в конце этапа молчания приемник потребляет ток 41 мА.

ПЛИС включен постоянно и потребляет «холостом режиме» 2 мА, однако в зависимости от действий, которые он производит на различных этапах цикла приема-передачи пакета его потребление возрастает. Так, при приеме пакета ПЛИС потребляет дополнительно 8 мА, при обработке пакета 2 мА, при передаче пакета 5 мА. Переключение между режимами происходит быстро и не учитывается в дальнейших расчетах.

Микроконтроллер во время приема, обработки и передачи пакета находится в активном режиме и потребляет 8.2 мА. На время паузы между пакетами

микроконтроллер переводится в спящий режим (Power Save) с потреблением 1.7 мкА, при этом переход в спящий режим происходит быстро, а выход их спящего режима для приема следующего пакета занимает 18.2 мс при потреблении тока 8.2 мА.

Кварцевый генератор, задающий тактовую частоту ПЛИС работает на частоте 48 МГц и в рабочем режиме потребляет 7.4 мА. В этом режиме кварцевый генератор находится во время ретрансляции пакета. На время паузы между пакетами кварцевый генератор отключается. Отключение происходит быстро, в выключенном состоянии кварцевый генератор ток не потребляет. Для приема следующего пакета кварцевый генератор снова включается, что занимает 10 мс при потреблении тока 7.4 мА. Компаратор и ЦАП работают только на этапе приема пакета, потребляя при этом 7.4 мА и 0.2 мА соответственно. На остальных этапах компаратор и ЦАП отключены. Включение и выключение этих блоков происходит быстро. Потребление стабилизатора зависит от общего потребления остальных блоков приемопередатчика. При высоком общем потреблении устройства во время ретрансляции пакета стабилизатор потребляет около 1 мА, при падении потребления устройства на этапе молчания потребление стабилизатора снижается до 0.5 мА.

Результаты расчетов энергопотребления приемопередатчика приведены в таблице 2

Таблица 2.

Потребление приемопередатчика	Среднее, мА
На этапе приема	0.97
На этапе передачи	0.53
При ретрансляции (прием+обработка+передача)	1.52
На этапе ожидания (в паузах между пакетами)	7.94
Общее	9.46

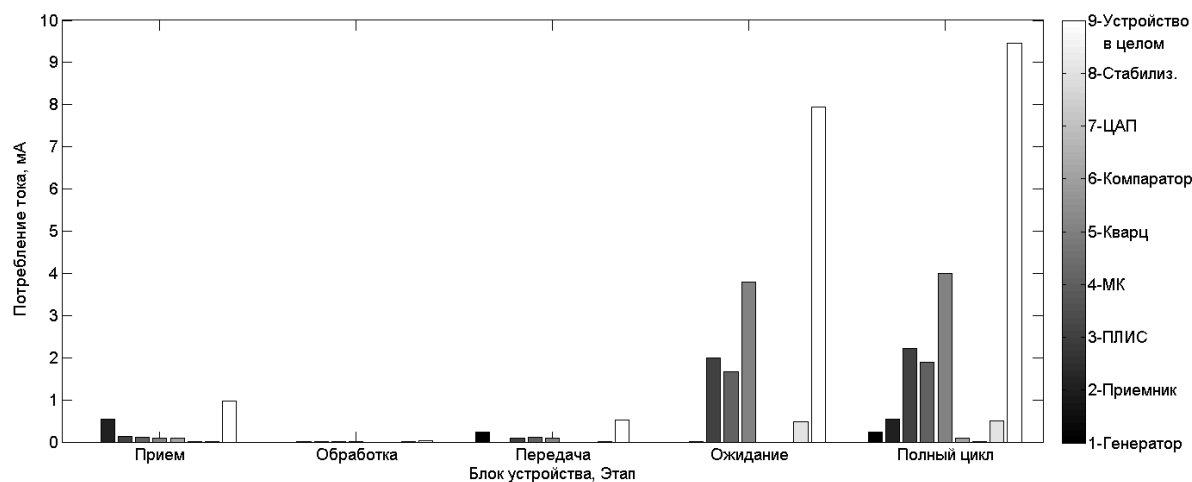


Рис. 5. Потребление блоков устройства на различных этапах цикла ретрансляции пакетов.

Из сравнения результатов, приведенных в таблицах 1 и 2 видно, что введение энергосберегающего сценария функционирования блоков приемопередатчика позволяет снизить энергопотребление почти в 8 раз. Причем как следует из анализа рисунков 3 и 5 основная экономия достигается за счет снижения затрат на этапе ожидания.

Анализ полученных результатов показывает, что основной вклад в общее энергопотребление в цикле ретрансляции пакета вносят ПЛИС и кварцевый генератор ПЛИС в паузе между пакетами. Это значит, что для дальнейшего уменьшения

энергопотребления устройства в первую очередь необходимо снизить потребление этих блоков на этапе ожидания. Уменьшения энергопотребления ПЛИС можно добиться, если использовать другую модель ПЛИС – MAX V. Для этой модели характерно более низкое базовое потребление – 27 мкА, вместо 2 мА для модели MAX II.

Кроме того, можно использовать одинарный компаратор, вместо двойного используемого в базовой модели, что позволит снизить потребление компаратора вдвое.

После произведенной модификации наиболее потребляющим блоком устройства остается кварцевый генератор ПЛИС. Для того чтобы решить эту проблему предлагается подавать тактовую частоту на ПЛИС не с кварцевого генератора, а с выхода микроконтроллера с последующим умножением частоты в ПЛИС. Это позволит избавиться от кварцевого генератора ПЛИС.

Потребление блоков устройства на различных этапах цикла ретрансляции пакетов приведены на рис. 6.

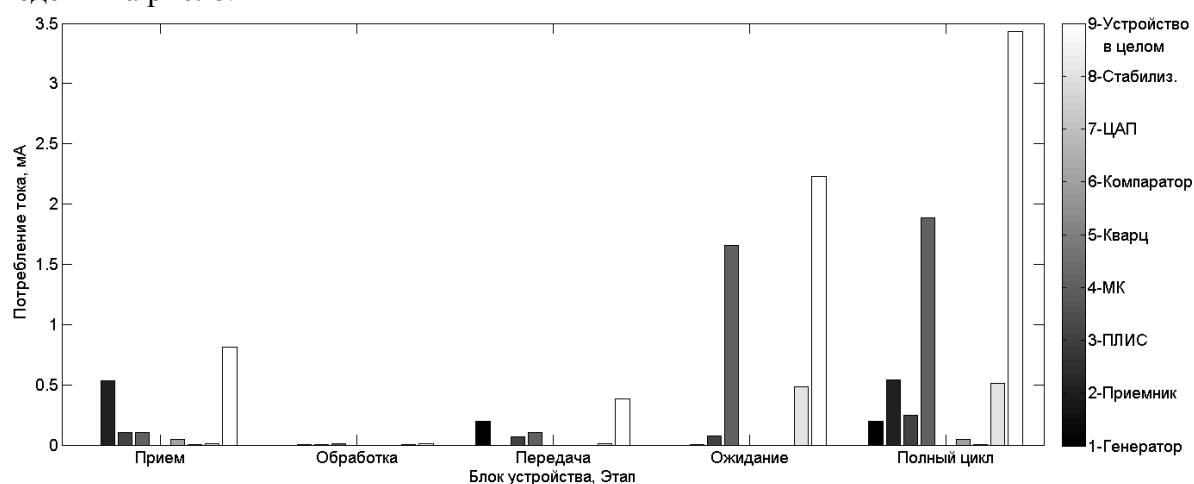


Рис. 6. Потребление блоков устройства на различных этапах цикла ретрансляции пакетов.

Как показывает анализ результатов в описанном случае наибольшее потребление приходится на микроконтроллер.

В устройстве тактовая частота микроконтроллера формируется при помощи внешнего пассивного кварцевого осциллятора. При переводе микроконтроллера в спящий режим кварцевый осциллятор отключается. При последующем переводе микроконтроллера в активный режим сначала запускается кварцевый осциллятор. Микроконтроллер может работать только когда кварцевый осциллятор выйдет на стабильный режим. Этим фактором определяется медленное время перехода микроконтроллера в рабочий режим (около 18 мс). Потребление микроконтроллера в процессе перехода из спящего режима в рабочий режим вносит основной вклад в общее потребление микроконтроллера и устройства в целом. Получаем следующие результаты для энергопотребления устройства (Таблица 3).

Таблица 3.

Потребление приемопередатчика	Среднее, мА
На этапе приема	0.8
На этапе передачи	0.38
При ретрансляции (прием+обработка+передача)	1.2
На этапе ожидания (в паузах между пакетами)	2.23
Общее	3.43

В результате произведенного изменения конструкции приемопередатчика можно снизить энергопотребление в паузах между пакетами до 2.2 мА, а общее потребление при ретрансляции пакетов на скорости 64 кбит/с до 3.4 мА.

Что означает, что при полной загрузке на скорости 64 кбит/с устройство сможет проработать 350 часов (700 часов) от батареи емкостью 1.2 Ач (2.4 Ач) или при 10% загрузке около 5 (10) месяцев.

б. Энергопотребление приемопередатчика в режиме передачи данных и в «спящем» режиме

Приведенные выше данные были получены для самого тяжелого режима- режима ретрансляции пакетов. А что мы имеем в случае передачи данных от сенсора? В этом случае устройству нет необходимости прослушивать эфир. Оно только время от времени шлет пакеты данных. Поэтому приемник, компаратор и ЦАП можно держать выключенными. Что приводит к потреблению устройства при передаче данных со скоростью 64 кбит/с – 2.6 мА или 8.6 мВт.

Когда устройство длительное время не используется для передачи или ретрансляции данных можно перевести его в спящий режим. При работе в глубоком спящем режиме устройство 1 раз в секунду просыпается и слушает эфир примерно в течение 20 мкс. Если за это время устройство получает из эфира сигнал побудки, оно переходит в активную фазу, если нет – снова засыпает.

В глубоком спящем режиме все блоки устройства отключаются за исключением микроконтроллера, который находится в режиме Power Down. В этом режиме потребление тока микроконтроллером составляет 20-30 мкА. Время выхода микроконтроллера из режима Power Down – 4.3 мс. Кроме того, еще 1 мс требуется для установления частоты кварцевого резонатора. Исходя из этих данных имеем следующую оценку для потребления устройства в спящем режиме.

При нахождении в глубоком спящем режиме в течение 100% времени устройство потребляет ток 80 мкА.

7. Экспериментальное исследование энергопотребления приемопередатчика

На основе описанного подхода к энергосбережению был разработан и изготовлен малопотребляющий приемопередатчик. При экспериментальной проверке энергопотребления устройства было установлено, что потребление в режиме передачи данных равно 2.8 мА, а в режиме ретрансляции 4 мА. При напряжении питания устройства 3.3 В потребление мощности устройством в режиме передачи данных на скорости 64 кбит/с равно 9.2 мВт, в режиме ретрансляции данных на скорости 64 кбит/с – 13.2 мВт.

8. Выводы

Проведено исследование энергопотребления сверхширокополосных прямохаотических приемопередатчиков и проанализированы пути снижения энергопотребления для обеспечения более продолжительной автономной работы.

В результате проведенных исследований предложена структура приемопередатчика и разработан сценарий функционирования отдельных блоков приемопередатчика, позволяющие обеспечить энергопотребление на уровне 2.8 мА (9.2 мВт) в режиме передачи и 4 мА (13.2 мВт) в режиме ретрансляции данных со скоростью 64 кбит/с.

Литература

1. G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey, *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, N. 3, pp. 537-568, 2009.
2. Mario Di Francesco, Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Sajal K. Das, and Vincenzo Neri, Reliability and Energy-efficiency in IEEE 802.15.4/ZigBee Sensor Networks: An Adaptive

- and Cross-layer Approach, IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol. 29, No. 8, 2011.
3. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А., Панас А.И., Старков С.О. "Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах", Радиотехника, 2000, № 3, с.9-20.
 4. А.С. Дмитриев, Б.Е. Кяргинский, А.И. Панас, Д.Ю. Пузилов, С.О. Старков, "Эксперименты по сверхширокополосной прямохаотической передаче информации в сверхвысокочастотном диапазоне", Радиотехника и электроника, 2002, т. 47, вып. 10, с. 1219-1228.
 5. Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I. et al. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. V. 13. № 6. P. 1495.
 6. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Старков С.О. Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса, Радиотехника и электроника, 2006, Т. 51, №10, с. 1193-1209.
 7. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В. Ю. "Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети", Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, №10, с. 1278-1289.
 8. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Старков С.О. "Сверхширокополосные коммуникационные системы на основе динамического хаоса", Успехи современной радиоэлектроники, 2008, №1, с. 4–16.
 9. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Синякин В.Ю. "Технологическая платформа для создания приемопередатчиков на основе хаотических сигналов", Успехи современной радиоэлектроники, 2008, №1, с. 77–83.
 10. 802.15.4a-2007. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between systems – Local and metropolitan area networks – specific requirement. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). N.Y.: IEEE, 2007. <http://iee-explore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4299494>.