

Остин Харни (Austin Harney)
 Конор О'Мэхони (Conor O'Mahony)
 Перевод: Александр Казакевич
 alexandr.kazakevich@eltech.spb.ru

Беспроводные устройства ближнего радиуса действия: нелицензируемый диапазон ниже 1 ГГц

В статье рассматриваются проблемы, с которыми могут столкнуться разработчики беспроводных устройств ближнего радиуса действия при создании систем субгигагерцового диапазона, рассчитанных на использование в различных регионах мира.

Введение

Под беспроводным устройством ближнего радиуса действия (short-range device, SRD) понимается радиопередатчик, обеспечивающий одно- или двунаправленную связь и не создающий больших помех другим радиосистемам. Составить полный список приложений SRD практически невозможно. Эти устройства могут использоваться во многих областях человеческой деятельности. Типичные области применения:

- дистанционный контроль автоматических устройств на производстве и в быту;

- беспроводные датчики;
- автомобилестроение, в том числе бесконтактные замки и системы удаленного запуска;
- системы сигнализации;
- беспроводное управление аудио- и видеотехникой.

Конструкторы беспроводных SRD-систем должны уделять особое внимание выбору частоты радиосвязи. В большинстве случаев выбор ограничен теми участками спектра, которые не требуют лицензирования и в то же время отвечают требованиям разработчика. В таблице 1 представлены общедоступные частотные диапазоны. Диапазон 2,4 ГГц популярен у разработчиков систем, которые предназначены для работы в любом регионе мира. Это частотный диапазон стандарта Bluetooth, WLAN и ZigBee. Диапазон 5,8 ГГц также привлекает внимание, например, для использования в беспроводных телефонах или WLAN версии 802.11a.

Т а б л и ц а 1. Частотные диапазоны SRD

Повсеместно доступные диапазоны частот	Комментарий
13,56 МГц	Часто используется для связи на малых расстояниях (бесконтактные карты, ключи и т. п.)
40 МГц	Редко используется, возможна дальняя связь
433 МГц	В США требуется пониженный уровень мощности
2,4 ГГц	Популярный общедоступный диапазон
5,8 ГГц	Некоторые системы перестраиваются с 2,4 ГГц
Региональные диапазоны частот	
868 МГц / 915 МГц	Доступны в Европе, США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии

Т а б л и ц а 2. Некоторые региональные диапазоны SRD

Регион	Соответствующий стандарт	Диапазон частот	Ссылки
Европа	ERC REC 70-03 EN 300 220 (Sept. '00)	433,05-434,79 868-870	http://www.ero.dk http://www.etsi.org
	EN 300 220 (Feb. '06)	863-870	
США	FCC Title 47 Part 15.231 Part 15.247	260-470 902-928	http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_04/47cfr15_04.html
Канада	RSS-210	260-470 902-928	http://strategis.ic.gc.ca/epic/internet/insmt-gst.nsf/en/sf01320e.html
Япония	ARIB STD-T67	426,0375-426,1125 429,175-429,7375	http://www.arib.or.jp/english/
Китай	Radio regulations of the people's republic of china	315-316 430-432	http://ce.cei.gov.cn/elaw/law/lb9311e.txt
Австралия	AS/NZS 4268:2003	433,05-434,79 915-928	http://www.acma.gov.au/ACMAINTER.131180
Россия	Приказ Минсвязи РФ от 18 мая 2001 г. N 136	433,075-434,79*	http://www.minsvyaz.ru

* - мощность излучения не должна превышать 10 мВт (10 дБм)

Диапазон до 1 ГГц остается привлекательным для приложений, требующих большей дальности и экономичности, в частности, для устройств с автономным питанием.

Увеличение дальности распространения радиоволн с уменьшением частоты можно проиллюстрировать при помощи упрощенной формулы Фриса (Friis), связывающей мощность, получаемую приемной антенной $P_{пр}$, и мощность, подводимую к излучающей антенне $P_{из}$:

$$P_{пр} = P_{из} \lambda^2 / (4\pi d)^2 = P_{из} c^2 / (4\pi f d)^2$$

В уравнении принимается, что обе антенны имеют единичное усиление. Видно, что для фиксированной передаваемой мощности $P_{из}$ принимаемая мощность уменьшается пропорционально квадрату расстояния d и квадрату частоты f (или уменьшению квадрата длины волны λ). Связь прервется, если мощность принимаемого сигнала упадет ниже уровня, необходимого для корректной демодуляции (называемого порогом чувствительности).

Доступные диапазоны частот ниже 1 ГГц

В таблице 2 дано более детальное описание стандартов субгигагерцового диапазона. Этот список не является исчерпывающим, более детальную информацию можно найти по приведенным в таблице ссылкам.

Диапазон 433 МГц является повсеместным, с некоторыми отличиями по частоте в Японии. Это не является проблемой для современных гибких трансиверов, например ADF7020 (рис. 1) или ADF7021. Однако доступная полоса частот в этом диапазоне составляет менее 2 МГц, что затрудняет использование этого канала для аудио- и видеоприложений, а также для систем передачи больших объемов информации. По этой причине данный диапазон используется, как правило, для электронных замков и систем удаленного контроля.

Диапазоны вблизи 868 МГц (Европа) и 902–928 МГц (США) более функциональны, они имеют расширенные возможности применения, и для них требуются антенны меньших размеров. В Австралии и Канаде имеются адаптированные версии спецификаций на этот диапазон. Таким образом, эта область частот является весьма распространенной, хотя и не повсеместной.

До выхода последней спецификации EN 300 220 сообщества США и Европы использовали совершенно разные стандарты. В США используется метод перескока по частоте, в Европе — метод ограничения длительности рабочего цикла в каждом поддиапазоне в соответствии с ERC REC-70. Оба подхода позволяют минимизировать помехи, однако производителям, разрабатывающим системы для обоих регионов, требовалось адаптировать уровень управления доступом к среде (media-access layer, MAC) в протоколе системы связи для каждого из них.

К счастью, в последних европейских положениях EN 300 220 (вышедших в середине 2006 года) расширен диапазон частот. Это дает возможность реализовать методы расширения спектра с перескоками по частоте (frequency-hopping spread-spectrum, FHSS) или расширения спектра прямой последователь-

Поддиапазон	Число каналов	Мощность/магнитное поле	Другие требования
865–868 МГц	≥ 60	≤ 25 мВт	LBT или передача <1% от рабочего цикла
863–870 МГц	≥ 47	≤ 25 мВт	LBT или передача <0,1% от рабочего цикла

ностью (direct-sequence spread-spectrum, DSSS). Протокол MAC в Европе стал более похожим на тот, который был разработан в США, хотя некоторые различия все еще сохраняются. В следующей части будут описаны некоторые детали новой спецификации, необходимые разработчикам SRD-систем.

Системы с перескоком частоты

Технология FHSS подразумевает распределение энергии по временному интервалу посредством деления спектра на каналы, причем переключение между ними происходит в псевдослучайной последовательности (кода перескоков), известной как приемнику, так и передатчику. Для обеспечения синхронизации нового подключения к сети ведущее устройство периодически посылает сигнал запроса. Время синхронизации зависит от периода сигналов запроса и числа каналов. Стандарты США и Европы предусматривают схожее число каналов и максимальное время пребывания на канале 400 мс.

В таблице 3 представлено число каналов, эффективная излучаемая мощность (ЭИМ) и требова-

ния по ограничению цикла для расширенного частотного диапазона (ниже 870 МГц) в Европе при использовании FHSS. В отличие от ранее доступной полосы в 2 МГц, сейчас доступен диапазон шириной 7 МГц — как для метода связи listen-before-talk, LBT («слушай-перед-тем-как-сказать»), так и для метода ограничения рабочего цикла.

«Вежливый» протокол связи LBT перед началом передачи сканирует каналы на активность. Называемый еще «доступом к свободному каналу» (clear-channel-assessment, CCA), он используется в системах с перескоком по частоте без ограничения цикла пребывания.

Широкополосная модуляция: DSSS

Кроме FHSS, метод расширения спектра прямой последовательностью (DSSS) также отражен в новых европейских положениях. Для расширения спектра в системе DSSS узкополосный сигнал умножается на высокочастотную псевдослучайную числовую последовательность (ПСП). Каждый импульс ПСП

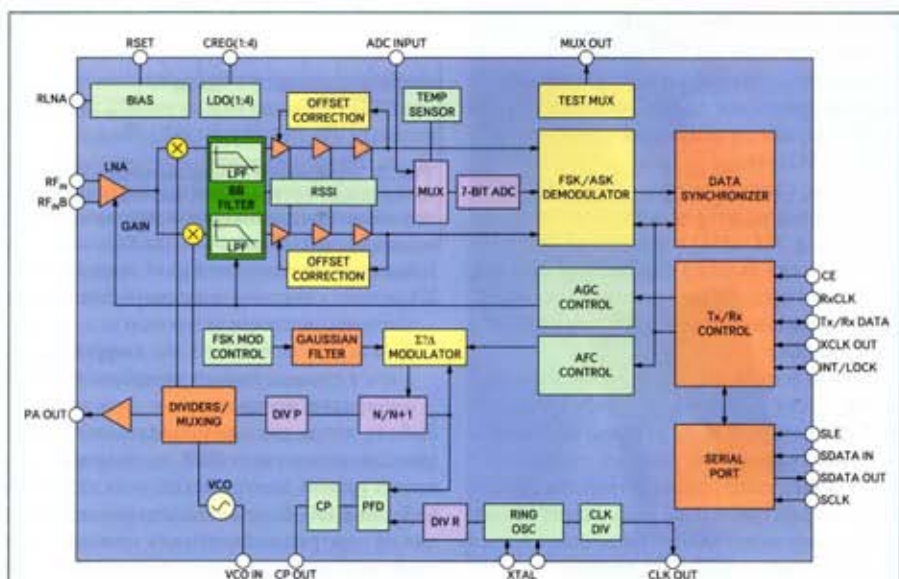


Рис. 1. Блок-схема трансивера ADF7020

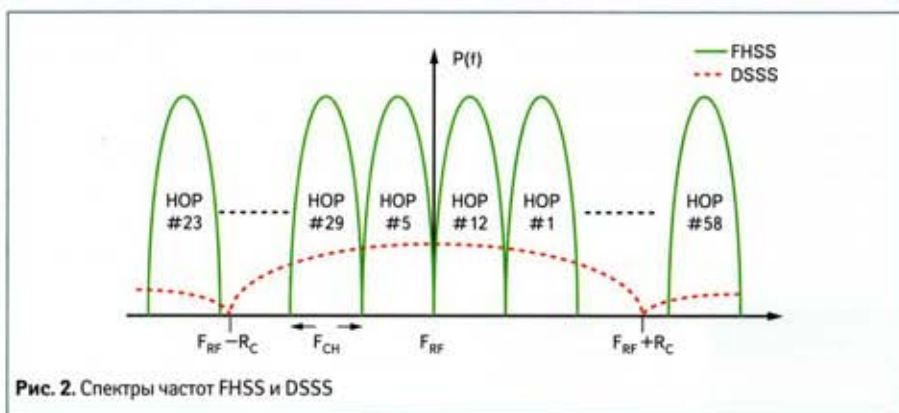


Рис. 2. Спектры частот FHSS и DSSS

называется «отсчетом» (chip), а скорость последовательности называется «скоростью дискретизации» (chip rate). Величина расширения спектра характеризуется степенью обработки, то есть отношением частоты дискретизации к частоте узкополосного сигнала. Частотные спектры FHSS и DSSS представлены на рис. 2.

В приемнике для получения исходного узкополосного сигнала спектрально расширенный сигнал умножается на ту же псевдослучайную последовательность. При этом любой другой узкополосный сигнал воспринимается демодулятором как широкополосный шум. Выделение различных кодов ПСП позволяет разделять пользователей в одном и том же частотном диапазоне (Это возможно благодаря ортогональности выделяемых ПСП. — Прим. пер.). Это известно как множественный доступ с кодовым разделением code-division multiple access (CDMA).

Примеры использования модуляции DSSS: IEEE 802.15.4 (WPAN), IEEE 802.11 (WLAN) и GPS. Основными преимуществами DSSS являются:

- 1) Подавление помех — принцип действия заключается в том, что полезный сигнал дважды умножается на код ПСП (расширение спектра — сужение), тогда как помеха только раз (расширение спектра).
- 2) Низкая спектральная плотность, обеспечивающая минимальные помехи для узкополосных систем.
- 3) Безопасность — защита от перехвата или подавления вследствие расширения или сужения спектра
- 4) Смягчение эффектов множественного доступа.

Способы модуляции, отличные от FHSS и DSSS

Интересной особенностью европейских правил является допущение других, отличных от FHSS и DSSS, вариантов модуляции с расширением спектра. Модуляция со сдвигом частоты и модуляция со сдвигом частоты с Гауссовым фильтром (frequency shift-keying/Gaussian frequency shift-keying, FSK/GFSK) с полосой частот более 200 кГц также входят в европейские правила. В таблице 4 представлены основные спецификации широкополосных схем модуляции в Европе (включая DSSS).

Примером устройства, использующего преимущества этого стандарта, является трансивер AD7025, который обеспечивает модуляцию со сдвигом частоты. Для работы в поддиапазоне 865–870 МГц конструкция устройства должна удовлетворять требованию максимально занимаемой полосы частот (99%) и обеспечивать предел максимальной плотности излучаемой мощности. Стандартизован также уровень мощности на краю канала (или диапазона): –36 дБм.

Приемопередатчик ADF7025, сконфигурированный согласно таблице 5, отвечает всем трем перечисленным требованиям. На рис. 3 показан спектр излучения ADF7025 в полосе частот 1.7569 МГц. Пиковая спектральная плотность составляет –1.41 дБм/100 кГц.

Трансивер ADF7025, использующий широкополосную модуляцию, способен передавать данные со скоростью 384 кбит/с, обеспечивая передачу звука и видео среднего качества (несколько кад-

Т а б л и ц а 5. Параметры широкополосной модуляции ADF7025

Частота Модуляция	867.5 (433.92) МГц
Смещение частоты	Со сдвигом частоты ± 250 кГц
Битрейт	384 кбит/с

Т а б л и ц а 4. Максимальная плотность излучения, полоса частот и пределы длительности рабочего цикла для модуляции с расширением спектра (кроме FHSS) и широкополосной модуляции

Поддиапазон	Занимаемая полоса частот (99%)	Максимальная плотность излучения	Требования
865–868 МГц	0,6 МГц	6,2 дБм / 100 кГц	передача 1% от рабочего цикла
865–870 МГц	3,0 МГц	-0,8 дБм / 100 кГц	передача 0,1% от рабочего цикла
863–870 МГц	7,0 МГц	-4,5 дБм / 100 кГц	передача 0,1% от рабочего цикла

ров в секунду) в европейских субгигагерцовых диапазонах.

Нормы, принятые в США (FCC Part 15.247), схожи с европейскими. Описывая работу систем с перескоком частоты в диапазонах 902–928 МГц, 2400–2483,5 МГц и 5725–5850 МГц, они также допускают другие способы «цифровой модуляции». Подобно понятию «широкополосной модуляции», принятому в Европе, этот расхожий термин включает модуляцию с расширением спектра (DSSS) и другие простейшие виды модуляции (модуляция со сдвигом частоты и модуляция со сдвигом частоты с Гауссовым фильтром). Два основных требования заключаются в следующем:

позволяет работать как в режиме «цифровой модуляции», определенной стандартами США, так и в режиме «широкополосной модуляции», определенной в новых европейских положениях.

Требования по переходной мощности

Разработчикам необходимо также учитывать требования по переходной мощности в европейских положениях, которая определяется как мощность, попадающая в соседнюю область спектра при включении или выключении передатчика в процессе работы. Это ограничение добавлено в последние положения для исключения спектрального шума.

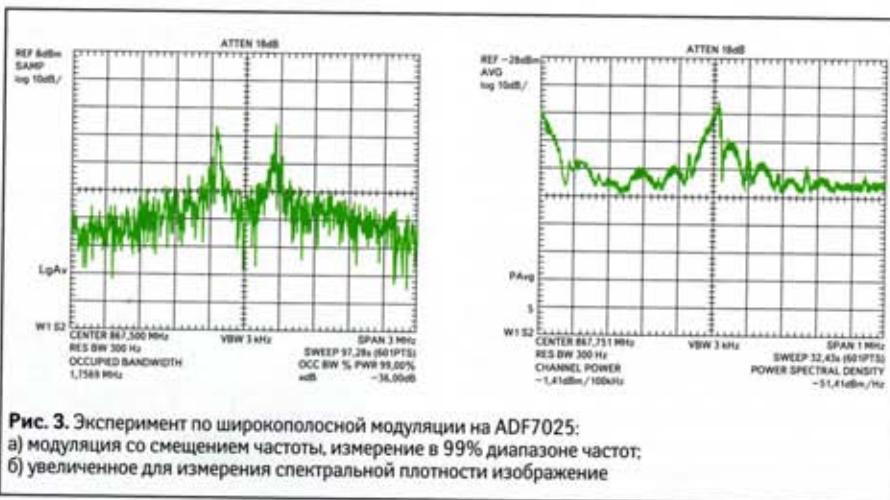


Рис. 3. Эксперимент по широкополосной модуляции на ADF7025: а) модуляция со смещением частоты, измерение в 99% диапазоне частот; б) увеличенное для измерения спектральной плотности изображение

1. Полоса частот по уровню 6 дБ не менее 500 кГц.
2. В системах с цифровой модуляцией спектральная плотность мощности от излучателя к антенне должна быть не больше 8 дБм в любой полосе 3 кГц в течение любого интервала времени непрерывной передачи.

Любому, кто желает задействовать систему модуляции, отличную от FHSS, необходимо ограничить уровень электрического поля до 50 мВ/м (-1.5 дБм ЭИМ). В случае соблюдения ограничения по спектральной плотности мощности при «цифровой модуляции» максимальная выходная мощность составляет 1 Вт. Поэтому при использовании ADF7025 в режиме модуляции со смещением частоты, достаточным для обеспечения полосы 500 кГц по уровню 6 дБ, допустимо излучение 1 Вт. Кроме того, в случае широкой частотной полосы возможны более высокие скорости передачи данных (384 кбит/с для ADF7025).

Подавление помехи внутри канала у ADF7025 лежит в диапазоне от –2 дБ (в худшем случае) до 24 дБ, в зависимости от полосы частот шума. Это можно сопоставить с коммерчески доступным DSSS-трансивером, соответствующим нормам IEEE 802.15.4, с подавлением стандартной помехи внутри канала –4 дБ.

С использованием описанных подходов могут быть построены системы с широкополосной модуляцией как для Европы, так и для США, благодаря чему упростится производство (за счет универсализации). Архитектура трансивера ADF7025

По мере возрастания тока усилителя мощности УМ (включение) или убывания (выключение) нагрузка генератора, управляемого напряжением (ГУН), изменяется, разрывая цепь обратной связи ФАПЧ. Это вызывает появления выбросов — спектрального шума на время восстановления обратной связи. В системах, содержащих модуль, постоянно передающий в ограниченные интервалы времени, мощность шумов в соседних каналах существенно увеличивается.

Рис. 4 иллюстрирует проблему спектрального шума. Зеленая линия показывает выходной спектр УМ передатчика ADF7020, когда он вклю-

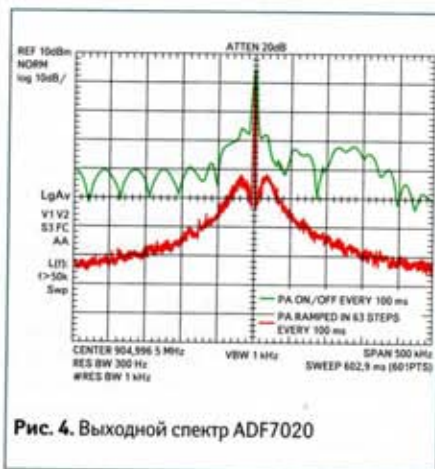


Рис. 4. Выходной спектр ADF7020

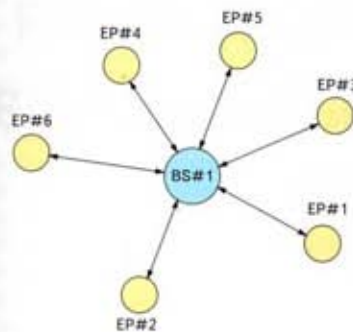


Рис. 5. Топология сети типа «звезда»

чается и выключается каждые 100 мс (спектральный анализатор при этом находится в режиме удержания). Видно, что значительная часть мощности излучения попадает в соседние каналы по обе стороны от несущей частоты. Красная линия соответствует выходному спектру УМ при постепенном (63 шага) включении и выключении каждые 100 мс и показывает существенное снижение шумов в соседних каналах.

Технические условия 8.5 последних положений EN 300 220 устанавливают ограничение на мощность, попадающую в соседние каналы. Регламентируется мощность, попадающая во второй, четвертый и десятый каналы по обе стороны от несущей при включении передатчика на полную мощность и выключении его 5 раз в секунду.

Простейший способ выполнения требований спецификации — постепенное включение и выключение УМ. Это возможно при помощи микроконтроллера. В случае передатчика ADF7020 возможно включение УМ до мощности в 14 дБм максимум в 63 шага. Проще и быстрее использовать автоматическое постепенное включение и выключение. ADF7021 обладает такой возможностью, позволяя задавать число и длительность шагов.

Протокол связи

Компания Analog Devices разрабатывает обновления программного обеспечения протокола ADIsmLINK (Version 2.0), который может использоваться с трансиверами серии ADF702x. Этот протокол, предназначенный для использования в субгигагерцовом диапазоне, отвечает новым европейским требованиям. Он базируется на топологии сети типа «звезда» (до 255 подключений, рис. 5).

Протокол основан на схеме множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий (carrier sense multiple-access with col-

lision avoidance, CSMA-CA). Каждое подключенное к сети конечное устройство (end point — EP) сначала прослушивает канал и только потом передает данные, избегая таким образом наложений.

Непрерывность протокола означает, что устройство может приступить к передаче сразу после получения данных после первого выполнения операции LBT. Такой подход не требует синхронизации. Если конечное устройство получает информацию о занятости канала, происходит сброс на некоторый период времени до выполнения следующей операции LBT. Число таких сбросов ограничено, отсюда нестационарная природа протокола. В режиме FHSS протокол использует систему множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий на каждом из каналов, выполняя, таким образом, требования LBT европейских положений. Параметры физического уровня и уровня доступа к среде ADIsmLINK легко конфигурируются, что обеспечивает его адаптацию к системе и устройствам. Протокол является составной частью комплекта разработки ADF702x (ADF70xxMB2). Структура протокола ADIsmLINK представлена на рис. 6. Более подробная информация доступна на сайте ADI [6].

Заключение

Новые европейские положения определяют весьма специфические требования к протоколу беспроводной связи в диапазоне 863–870 МГц. Вне зависимости от использования одноканального протокола (FHSS или DSSS) существуют особые правила, учет которых усложняет процесс разработки устройства. Однако в новых положениях ETSI есть части, сходные с FCC Part 15.247, что упрощает разработку протокола, предназначенного для использования в различных регионах. Кроме того, образцы протокола поставляются с отладочным набором ADF70xxMB2 Analog Devices, благодаря чему упрощается задача построения беспроводной сети ближнего радиуса действия. BT

Литература

1. <http://www.bluetooth.com/bluetooth/>.
2. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>.
3. <http://www.zigbee.org/en/index.asp>.
4. www.analog.com, поиск по ключевому слову ADF7020.
5. www.analog.com, поиск по ключевому слову ADF7025.
6. www.analog.com, поиск по ключевому слову EVAL-ADF70xx.

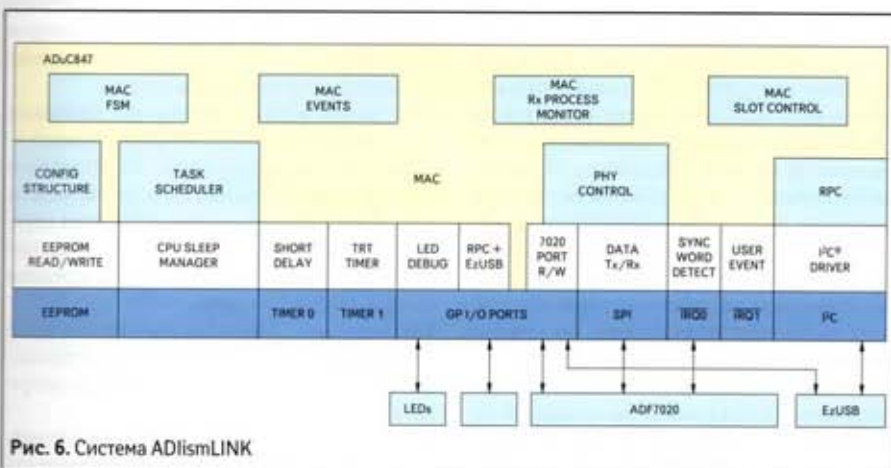


Рис. 6. Система ADIsmLINK