

Андрей Самоделов (г. Москва)

КОНЦЕРТ ДЛЯ СЧЕТЧИКА И СЕТИ: PLC-МОДЕМЫ КОМПАНИИ TEXAS INSTRUMENTS



Texas Instruments предлагает разнообразные решения для PLC – передачи данных измерений от счетчиков электроэнергии по силовым сетям. Гибкость в стандартах – поддерживаются стандарты модуляции OFDM и SFSK и европейский диапазон несущих частот Cenelec. Гибкость в решениях – используются DSP семейств Piccolo и Concerto, а также специализированная микросхема от TI для обработки аналогового сигнала – AFE031.



Основными типами модуляции, которая используется при обмене данными по силовым сетям (PLC) с помощью специальных устройств – PLC-модемов, являющихся частотная манипуляция (Frequency Shift Keying, FSK), частотная манипуляция с разнесенными частотами (Spread Frequency Shift Keying, S-FSK) и ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов (OFDM). Наиболее популярным видом модуляции для PLC-модемов компании Texas Instruments (TI) является OFDM-модуляция. Этот выбор обусловлен ее высокой помехозащищенностью и наличием международных стандартов. Для повышения гибкости и адаптируемости к местным стандартам компания TI разработала и запатентовала собственный стандарт OFDM-модуляции – FlexOFDM. Кроме того PLC-модемы компании TI поддерживают стандарты PRIME и G3 для OFDM-модуляции.

OFDM-модуляция

OFDM-модуляция основана на многочастотном алгоритме Discrete Multi Tone (DMT), который был разработан и запатентован специалистами из Amati Communications (ныне подразделение

Texas Instruments Internet Access group) в начале 1990-х. Сложность технической реализации не позволяла на начальных этапах использовать его для DSL-связи. С развитием микроконтроллеров, и прежде всего – DSP, появились многочисленные реализации алгоритма DMT, в частности, OFDM-модуляция.

Алгоритм DMT построен по принципу разделения всего диапазона частот, используемого для обмена данными, на несколько участков шириной по 4,3125 кГц, которые используются для независимой передачи данных.

При передаче данных информация распределяется между независимыми каналами пропорционально их пропускной способности. При приеме выполняется демultipлексирование каналов и восстановление исходного информационного потока.

Для повышения качества связи передатчик, исходя из уровня помех в частотном диапазоне участка, выбирает подходящую модуляционную схему и скорость передачи. На каналах с малым уровнем шумов часто используются алгоритмы QAM 64, а на более зашумленных каналах – более простые алгоритмы, например QPSK.

Алгоритм OFDM в отличие от DMT использует одно значение пропускной

способности и скорости передачи данных для элементарных каналов всего частотного диапазона.

К достоинствам OFDM можно отнести высокую скорость передачи данных и способность отстраиваться от помех в линии. Еще одним достоинством алгоритма OFDM является наличие для него стандартов ITU и ANSI.

Основной недостаток метода – невозможность избирательной адаптации пропускной способности элементарных каналов к частотным характеристикам линии. Элементарные частотные каналы OFDM разделяются заградительными интервалами. При увеличении числа элементарных частотных каналов, пропорционально увеличивается ширина частотного интервала, который не может быть использован непосредственно для передачи данных. Это приводит к невысокой, по сравнению с базовым алгоритмом DMT, эффективности использования полосы пропускания линии.

Диапазоны частот для PLC

Диапазоны несущих частот определяются локальными инструкциями. Эти инструкции для основных регионов мира приведены в таблице 1.

Европейский стандарт для узкополосной низкочастотной передачи данных по PLC-каналам определяет четыре основные сетки частот, которые отображены в таблице 2.

Таблица 1. Диапазоны несущих частот PLC для основных регионов мира

Регион	Инструкция	Диапазон частот, кГц	Регулирующая организация
Европа	CENELEC	0...500	Европейский Комитет по Электротехнической Стандартизации (European Committee for Electrotechnical Standardization)
США	FCC	10...490	Федеральное Агентство по Связи США (Federal Communications Commission)
Япония	ARIB	10...450	Ассоциация Радио Индустрии и Бизнеса Японии (Association of Radio Industries and Businesses)
Китай	EPRI	3...500 (3...90)	НИИ Электроэнергетики (Electric Power Research Institute)

Таблица 2. Сетка частот Cenelec

Сетка	Диапазон частот, кГц	Назначение
Cenelec A	0...95	Исключительно для поставщиков электроэнергии
Cenelec B	95...125	Открыты для использования любыми приложениями
Cenelec C	125...140	
Cenelec D	140...148	

Для сеток Cenelec A, B, D уровень протокола определяется стандартами или патентами. Для сетки Cenelec C определен доступ по стандарту CSMA (Carrier Sense Multiple Access – множественный доступ с контролем несущей).

Основными областями применения PLC модемов являются

- Счетчики электроэнергии
- Управление освещением
- Домашняя автоматика
- Промышленная автоматика
- Солнечная энергетика
- Зарядные устройства для электромобилей (EVSE)

PLC-решения от TI

Среди реализованных компанией TI есть как стандартные, так и собственные, запатентованные решения. Основные поддерживаемые компанией TI стандарты приведены в таблице 3.

Основными принципами создания решений для TI являются гибкость и масштабируемость. Оба эти принципа обеспечиваются за счет полной программируемости и модифицируемости решений для требований конкретной задачи.

Гибкость обеспечивается за счет использования решений, основанных на двух микросхемах: сигнальном процессоре семейства **C2000**; и отдельной микросхеме для работы с аналоговым сигналом (Analog Front-End, AFE).

Такой подход гарантирует полную программируемость решения за счет использования процессоров **F28x** (MAC и PHU) и обеспечивает возможность работы как в режиме S-FSK, так и в режиме низкочастотной узкополосной OFDM модуляции (LF NB OFDM) для стандартов PRIME и G3.

В настоящее время осуществляется миграция решений TI для PLC-модемов: от использования отдельных компонентов для реализации функциональных блоков – к выпуску однокристальных решений для функционального блока в целом. На рисунке 1 показана схема такой миграции.

Стандартное PLC-решение от TI состоит из трех основных частей:

- Блок цифровой обработки информации (DSP)
- Блок обработки аналогового сигнала (AFE)
- Схема согласования с линией (Coupling Circuit)

На рисунке 2 показана типовая блок-схема PLC-модема от TI.

Блок цифровой обработки информации (DSP)

Блок цифровой обработки информации, как правило, реализуется на мощных сигнальных процессорах (DSP) семейства C2000. Далее будут рассмотрены некоторые из перспективных микросхем для реализации PLC модемов.

Микроконтроллеры TMS320F28069 из семейства Piccolo™ с гарвардской архитектурой основаны на высокопроизводительном ядре C28x™ и работают на тактовой частоте 80 МГц, имеют 128 кбайт Flash-памяти, 50 кбайт ОЗУ и 1 кбайт OTP ROM. Микроконтроллеры имеют аппаратный умножитель-аккумулятор, который может работать в режимах 16x16, 32x32 или вдвоенном 16x16 разрядов. Для ускорения выполнения сложных алгоритмов имеются: сопроцессор для операций с плавающей точкой одинарной точности (FPU); программируемый ускоритель алгоритмов управления (CLA); блок алгоритмов Ви-

терби, комплексной арифметики и вычисления CRC (VCU). Эффективности выполнения программ способствуют быстрый ответ на прерывания и их обработка, унифицированная модель памяти, оптимизация кода как для C/C++, так и для ассемблера, и совместимость с кодом предыдущих семейств C28x.

Для тактирования микроконтроллера можно использовать два внутренних генератора, встроенный кварцевый генератор/вход внешнего тактирования с поддержкой динамического коэффициента умножения ФАПЧ. Надежность работы системы тактирования обеспечивается сторожевым таймером (WDT) и схемой обнаружения пропадания тактового сигнала.

Набор периферийных модулей включает: три 32-разрядных таймера CPU; восемь модулей расширенных ШИМ (ePWM) с 19 выходами, восемью каналами HRPWM и независимыми 16-разрядными таймерами в каждом канале; три входа захвата (eCAP) и четыре входа захвата с высоким разрешением (HRCAP); два модуля квадратурных энкодеров (eQEP); 12-разрядный АЦП с производительностью 3 MSPS, 16 входами и двояной схемой устройства выборки и хранения УВХ; два модуля SCI (UART); два модуля SPI; шину I²C; шину многоканального буферизованного последовательного порта (McBSP); модуль eCAN; модуль USB 2.0 (Full-Speed в режиме Device и Full-/Low-Speed в режиме Host).

Внутренние стабилизаторы обеспечивают работу от одного источника питания с напряжением 3,3 В, что избавляет от необходимости применения внешней схемы, обеспечивающей необходимую последовательность подачи напряжений на блоки микроконтроллера.

Микросхемы выпускаются в корпусах LQFP80/LQFP100 с повышенной теплоотдачей, выполненными по технологии PowerPAD™, и предназначены для работы в температурном диапазоне -40...125°C.

В качестве примера разработки PLC-модема на базе TMS320F28069, компания

Таблица 3. Основные стандарты для PLC, поддерживаемые компанией TI

Стандарт	Модуляция	Диапазон частот, кГц	Скорость обмена данными, кБод	Целевой процессор	Области применения	TI статус/доступность
IEC 61334	SFSK	60...76	1,2...2,4	Piccolo-A (TMS320F2802x), TMS320F28069	Измерительные устройства	Доступно
PRIME	OFDM	42...90	21...128	TMS320F28069, Concerto (F28x35x)		Доступно
G3	OFDM	35...90	2,4...34	TMS320F28069, Concerto (F28x35x)		Доступно
FlexOFDM (Запатентован TI)	OFDM	<10 (для FCC)	2,4...128	TMS320F28069	Солнечная энергетика, освещение, домашняя автоматика	Доступно (диапазоны Cen A, B)
FlexOFDM-lite Облегченный FlexOFDM (Запатентован TI)	OFDM	CenA CenB	<1...21	Piccolo-A (TMS320F2802x), Piccolo-B (TMS320F2803x)		Доступно (Piccolo-B для CenA), другие – в 2011 г.

TI выпускает набор **TMDSPCKIT-V3**, описанный в конце данной статьи.

Для увеличения функционала и интеграции в счетчиках электроэнергии TI предлагает *двухъядерные микроконтроллеры F28x35x семейства Concerto*. Эти контроллеры позволяют реализовать, например, электросчетчик и концентратор для PLC. Пример multifunctional счетчика – на рисунке 3.

Микросхемы F28M35x состоят из коммуникационного CPU с ядром Cortex-M3 и управляющего CPU с ядром C28x+FPU+VCU (соотношение тактовых частот обоих CPU 60/60, 75/100 и 100/150 МГц); от 512 кбайт до 1 Мбайт встроенной Flash-памяти; от 72 до 132 кбайт ОЗУ с ECC и контролем четности; модулей защиты памяти; аналоговой подсистемы и подсистемы межпроцессорной синхронизации. Коммуникационная подсистема содержит большое количество стандартных периферийных блоков для обмена данными: 10/100 Ethernet MAC с 1588; USB 2.0 OTG с интегрированным контроллером PHY-уровня; двоярный модуль CAN; интерфейсы SPI, UART, I²C; интерфейс внешней памяти с разрядностью 8/16/32. В состав периферийных блоков управляющей подсистемы входят расширенные модули ШИМ с разрешением ~150 псек для каждого канала и гибкой реакцией на аварийные ситуации. Аналоговая подсистема состоит из двух высокоскоростных 12-разрядных АЦП с двумя блоками УВХ каждый и аналоговых компараторов с внутренним ЦАП в канале ИОН.

Микросхемы выпускаются в корпусах QFP144 и BGA200+ и предназначены для работы в промышленном -40...105°C или автомобильном -40...125°C (AEC Q100) температурном диапазоне.

Для сертификации микросхем на удовлетворение самым жестким стандартам и регуляциям имеется полный комплект подробной документации.

В ближайшее время компания TI планирует выпустить **микросхему, принадлежащую к семейству TMS320F2806x Piccolo** высокопроизводительных микроконтроллеров, оптимизированную для работы в качестве **сигнального процессора PLC-модемов**. В состав микроконтроллера будут входить только необходимыми модули для реализации PLC, что позволит снизить его себестоимость по сравнению с TMS320F28069.

Микроконтроллер будет построен на 32-разрядном CPU C28x с тактовой частотой 80/90 МГц, с 256 кбайт Flash-памяти и 100 кбайт ОЗУ, с арифметическим сопроцессором (VCU) с аппаратной реализацией алгоритмов Витерби, операций с комплексными числами и вычисления сумм, прецизионным внутренним такто-

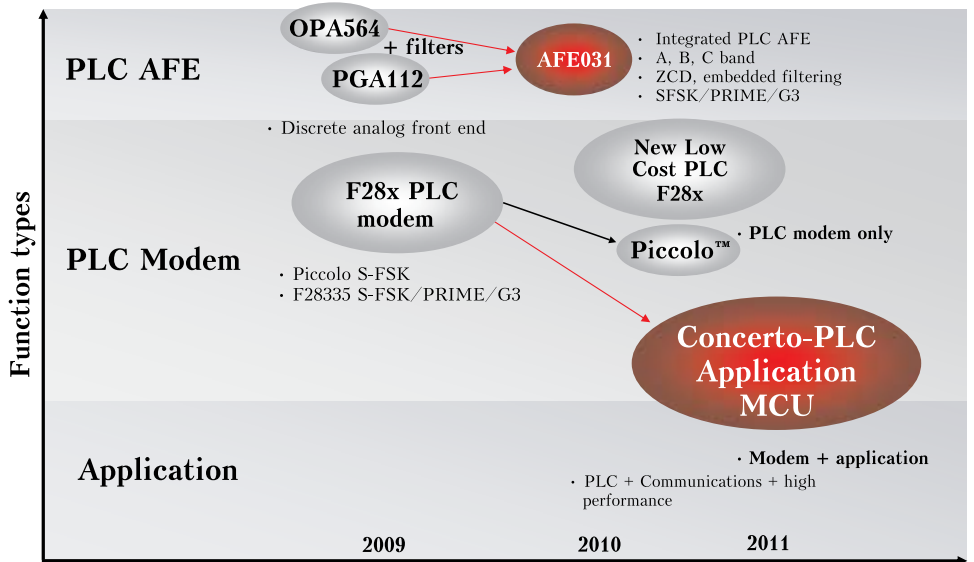


Рис. 1. Схема миграции решений TI для PLC-модемов

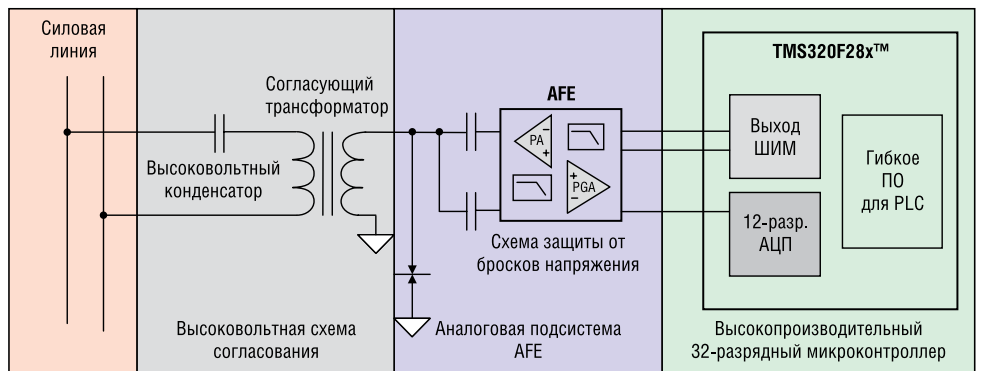


Рис. 2. Стандартный PLC-модем от TI

вым генератором с частотой 10 МГц, модулями ШИМ с разрешением 150 псек и 12-разрядным АЦП.

Для его питания потребуется один источник с напряжением 3,3 В.

Микросхемы предполагается выпускать в корпусе LQFP80 для температурного диапазона -40...125°C, в соответствии с AEC Q100, повысительно совместимых с существующими микросхемами семейства Piccolo.

Микроконтроллер будет поддерживать стандарты S-FSK/PRIME/G3 и OFDM в

пределах сетей Cenelec В/С и планируется к применению в силовых системах электромобилей (EVSE)/системах освещения/солнечных электростанциях.

Перейдем к рассмотрению второй подсистемы PLC модема – блоку обработки аналогового сигнала.

Блок обработки аналогового сигнала (AFE)

Интегрированный PLC AFE – микросхема AFE031 – поддерживает все виды LFNB-модуляции, такие как FSK,

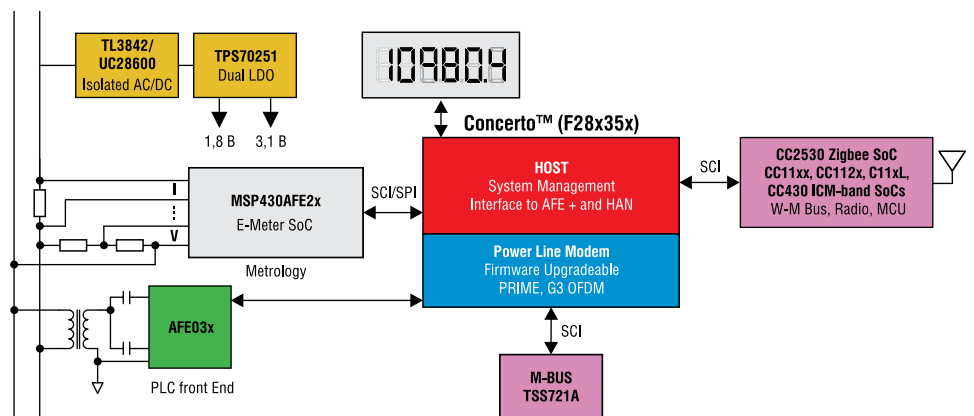


Рис. 3. Пример реализации электросчетчика с PLC-модемом, MBus и W-M Bus на базе Concerto

Таблица 4. Сравнение AFE031 с AFE на дискретных компонентах

Параметр	Дискретный AFE	AFE031
Количество активных компонентов	4+	1
Количество пассивных компонентов	>100	~10
Электромагнитная совместимость (EMC)	Хорошая	Лучше
ЦАП для генерации сигнала	Нет	Да
Euridis	Нет	Да
Детектор перехода через ноль	На дискретных элементах	Частично встроенный
Переключение диапазонов CENELEC	Требует больших затрат	Заменой внешнего конденсатора
Потребляемая мощность	Выше	Ниже
Стоимость системы	Выше	Ниже

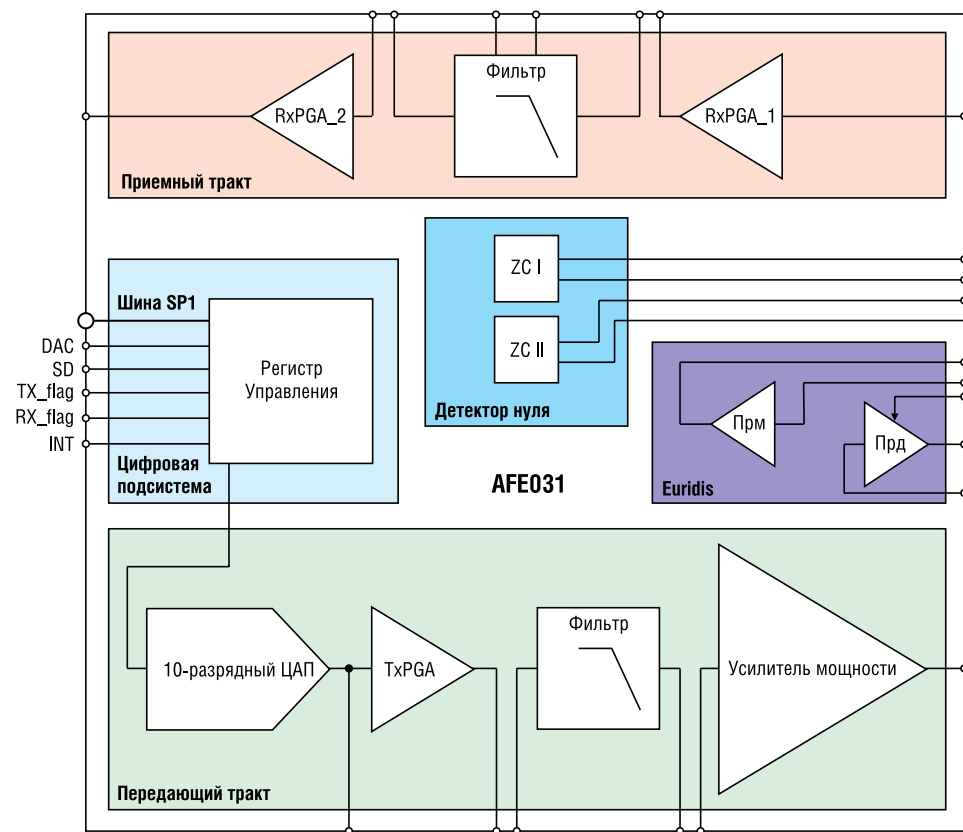


Рис. 4. Блок-схема AFE031

S-FSK и OFDM с поддержкой Cenelec A, B, C, D.

Приемник обладает чувствительностью 20 мкВ (с.к.з.) и имеет два интегрированных детектора перехода напряжения силовой сети через ноль.

Встроенный усилитель мощности и драйвер силовой линии с мощным выходом обеспечивают пиковое напряжение 13 В при выходном токе 1,5 А и напряжении питания 15 В. Имеется буфер передачи для стандартов Euridis 1 и 2

Для программирования AFE031 используется четырехпроводной SPI-интерфейс.

Энергопотребление в режиме приема составляет всего 15 мВт.

Все блоки микросхемы подключены к отдельным выводам.

AFE031 выпускается в корпусе QFN48 размером 7x7 мм с повышенной теплоотдачей и имеет расширенный температурный диапазон -40...125°C

Блок-схема AFE031 приведена на рисунке 4.

Основными областями применения AFE031 являются:

- Обмен данными по силовым сетям,
 - Счетчики электроэнергии и концентраторы,
 - Солнечные электростанции, зарядные устройства для электромобилей, домашняя автоматика,
 - Электромобили, уличное освещение,
 - Промышленные приложения.
- К главным преимуществам использования AFE031 можно отнести:
- Уменьшение стоимости и упрощение разработок,
 - Полностью интегрированные приемник и передатчик,
 - Гибкость, простота использования, низкая стоимость решений,
 - Замена для RS-485 для приложений с низкой скоростью обмена данными.

В таблице 4 приведено сравнение AFE031 с AFE на дискретных компонентах.

Рассмотрим подробнее внутреннюю структуру AFE031.

Тракт передачи имеет регулируемый с помощью блока TxPGA уровень выходного сигнала (-12 дБ, -6 дБ, -3 дБ, 0 дБ). Заводская регулировка фильтра передатчика (Tx) и программирование для соответствия Cenelec A, B, C, D (можно перенастроить) избавляет от необходимости дополнительной подстройки частотных диапазонов. В режиме ЦАП не требуется дополнительная фильтрация для соответствия требованиям Cenelec EN50065-1. Для экономии электроэнергии в режиме приема имеется функция выключения тракта передачи.

Выходной усилитель мощности обеспечивает уровень сигнала до 120 dBuVrms на нагрузке 2 Ом (требования PRIME), и имеет программируемое внешним резистором ограничение выходного тока от ±400 мА до ±1,5 А и регулировку коэффициента усиления в пределах 16 дБ. Выходной ток составляет до 1,5 А при питании от однополярного источника с напряжением от 7 до 26 В. Для повышения стабильности работы УМ имеет однополюсную передаточную характеристику. Диодный датчик температуры вырабатывает сигнал для отключения при перегреве.

Тракт приема имеет внешний полосовой фильтр, который ограничивает уровень шума и перекрестных помех, за которым следует маломощный приемник с чувствительностью 15 dBuVrms. Уровень сигнала регулируется блоком RxPGA1 (-12 дБ, -6 дБ, 0 дБ, 6 дБ) и блоком RxPGA2 (0 дБ, 12 дБ, 24 дБ, 36 дБ). Заводская регулировка фильтра приемника (Rx) и программирование для соответствия Cenelec A, B, C, D (можно перенастроить) избавляет от необходимости дополнительной подстройки частотных диапазонов.

Блок обнаружения перехода напряжения через ноль требуется при использовании S-FSK-модуляции для синхронизации с началом пакета и функционирует как логический элемент «ИЛИ-НЕ» с гистерезисом. При необходимости используется гальваническая развязка с помощью оптопар. В микросхеме имеется два однотипных блока.



Рис. 5. PLC-модем из набора TMDSPCKIT-V3

Блок **Euridis** обеспечивает обмен данными по силовой сети в соответствии со стандартом, используемым во Франции, при котором разнесение частот составляет 50 кГц. Блок состоит из приемника и передатчика.

Приемник имеет полосу пропускания 2...340 кГц, коэффициент усиления тракта приема (Rx) -4 дБ с постоянным напряжением смещения $V_{dd}/2$.

На выходе передатчика установлен стобируемый буфер.

Микросхема AFE031 программируется через **четырёхпроводный SPI-интерфейс**, который используется для работы с внутренними регистрами и поддержки ЦАП с данными PLC (временное мультиплексирование посредством вывода разряда ЦАП).

Несколько выводов GPIO используются для непосредственного доступа к:

- Выбору режима ЦАП/управление,
- Блоку отключения микросхемы,
- Сигналам Tx Ready/Rx Ready,

- Сигналу прерывания.

Схема согласования состоит из трансформатора, обеспечивающего гальваническую изоляцию и обладающего фильтрующим действием, и схемы детектора нуля, изолированной от силовой линии и необходимой для синхронизации пакетов в стандартах S-FSK и G3. Первичным использованием детектора нуля является временная синхронизация (не критичная при передаче).

Отладочный набор C2000 Power Line Modem Developer's Kit (TMDSPCKIT-V3)

Набор позволяет легко разрабатывать программное обеспечение для PLC-модемов. В него входят два PLC-модема с управляющей картой на базе микроконтроллера TMS320F28069 и микросхема аналоговой обработки сигнала AFE031. Входящее в комплект программное обеспечение **PLC SUITE** поддерживает ряд технологий обмена данными, включая OFDM (PRIME/G3 и FlexOFDM) и SFSK.

Внешний вид одного из модемов набора TMDSPCKIT-V3 показан на рисунке 5.

Отличительные особенности TMDSPCKIT-V3:

- Два PLC модема,
- Две управляющих карты на базе TMS320F28069,
- Встроенный USB JTAG эмулятор,
- Программное обеспечение для PLC, поддерживающее обмен данными по OFDM (PRIME, G3 и FlexOFDM) и S-FSK
- Среда разработки Code Composer Studio v4.x с ограничением на размер исполняемого кода 32 кбайт,
- Все необходимые источники питания и сигнальные кабели.

Литература

1. TMS320F28069 Piccolo Microcontroller. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tms320f28069.html>.
2. TMS320F28069 Piccolo Microcontroller. Datasheet. <http://www.ti.com/lit/gpn/tms320f28069>.
3. F28M3x Concerto™ Series. http://focus.ti.com/paramsearch/docs/parametricsearch.tsp?sectionId=95&familyId=2049&tabId=2744&family=mcu#parametric_jumper.
4. AFE031. Powerline Communications Analog Front End. Datasheet. <http://www.ti.com/lit/gpn/afe031>.
5. C2000 Power Line Modem Developer's Kit. <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/tmdsplckit-v3.html>.

Семейство
TMS320F2806x Piccolo -

Для систем с управлением в реальном времени

Ключевые особенности серии

- Модуль операций с плавающей точкой (FPU)
- Увеличенные тактовые частоты (80 МГц)
- Лучший в классе модуль ШИМ с разрешением до 150 пикосекунд
- Увеличенное количество коммуникационных модулей USB 2.0 Host, McBSP, 2xSCI, CAN, UART, SPI, I²C

Москва
Тел.: (495) 995-0901
Факс: (495) 995-0902

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9404
Факс: (812) 327-9403

www.compel.ru

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: analog.vesti@compel.ru