

Скоростной АЦП с нуля. 16 бит за 10 лет

- Блог компании Миландр,
- Локализация продуктов,
- FPGA,
- Схемотехника,
- Производство и разработка электроники

Чего стоит разработать быстродействующий аналого-цифровой преобразователь, почти не имея опыта? Насколько сильно наше отставание в этой области? Есть ли в этой нише шанс найти коммерческое применение своей продукции и отщипнуть хоть кусочек рынка у гигантов мира сего? Выпуская в свет новый 16-битный 80 МГц АЦП, хотим порассуждать на эти темы и рассказать о самой микросхеме и опыте её создания.



Введение

...2010 год. Тогда многие этим увлекались. Тема быстрых АЦП вдруг стала популярной. Кто-то раньше, кто-то позже, но сразу несколько российских компаний принялись вести разработки в этой области. Не стали исключением и мы. Словно нужно было дожидаться, когда рассеется дым горящих вокруг Москвы торфяников, чтобы увидеть, что ниша отечественных скоростных аналого-цифровых преобразователей совершенно пуста. Отставание было гигантским, в несколько поколений. Из «наших» тогда можно было достать только старые добрые микросхемы серии 1108ПВ — 10-14 разрядные АЦП с быстродействием 0,3-1,3 МГц, разработанные еще в советской Риге. Самым «крутым» считался вильнюсский биполярный 1107ПВ3, тоже родом из 80-х, который имел разрядность 6 бит и мог работать со скоростями до 100 МГц. В это же время

западные микросхемы на таких скоростях достигали уже 16 бит! А при меньшей разрядности могли работать на нескольких сотнях мегагерц.

Столь привлекательным казалось попытаться наверстать отставание и заполнить этот вакуум отечественного сегмента АЦП. Было очевидно: кто первый создаст что-то более-менее современное, у того будет шанс монополизировать в дальнейшем весь сегмент. Ввязавшись в гонку тогда, мы смутно догадывались, что путь предстоит неблизкий, но никто не предполагал, что первый верстовой столб на нём будет стоять на отметке в 10 лет...



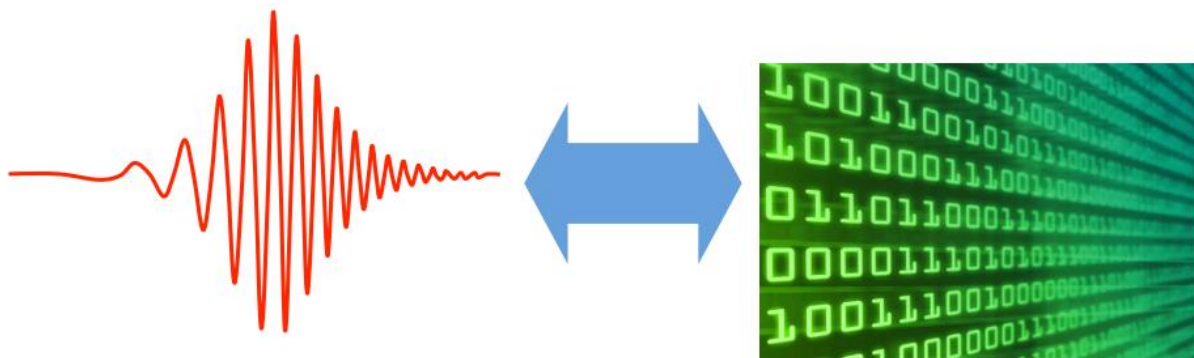
Смог в Зеленограде 2010 г. Фото с сайта Graker.ru

Что за зверь?

Здесь мы на секунду прервёмся, чтобы сказать несколько общих слов об аналого-цифровых преобразователях вообще и о быстродействующих в частности.

Наверное, каждый человек, сам того не подозревая, ежедневно имеет дело с АЦП. Электроника окружает нас повсюду, и, если речь идёт о современном устройстве хоть чуточку сложнее штепсельной вилки, в нём наверняка трудится этот девайс. А уж такая привычная нам техника, как смартфоны, видеокамеры, аудиопроигрыватели, игровые станции, и пр. буквально напичканы ими. Аналого-

цифровые преобразователи в их составе выполняют разную работу и имеют присущую этой работе **архитектуру**: это может быть SAR, Delta-sigma, Pipeline, Folded-interpolated, Flash, Dual-slope и т.д. Такое разнообразие видов обусловлено тем, что не существует оптимальной архитектуры для всех типов приложений. С точки зрения исполнения АЦП могут быть встроены в системы-на-кристалле или реализованы в виде отдельных микросхем.

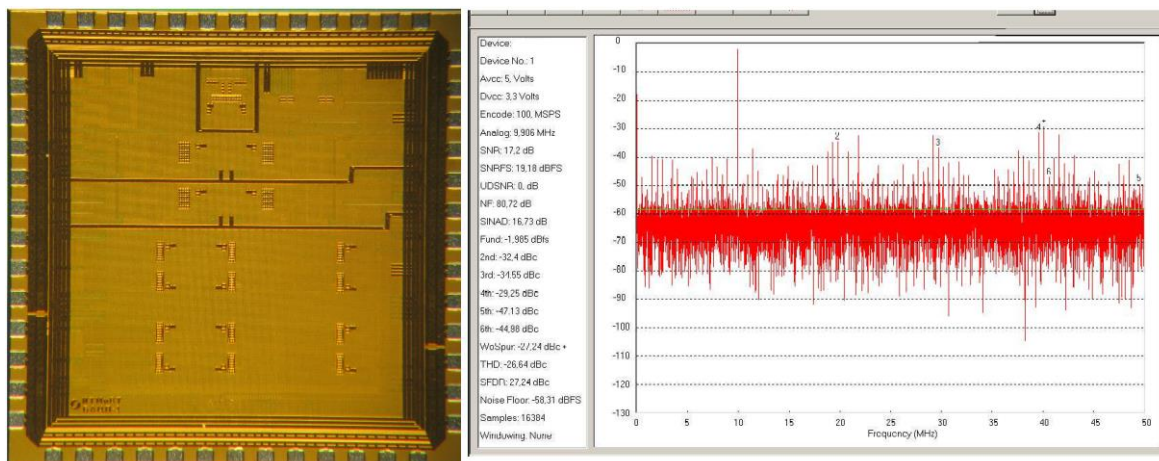


В системах радиосвязи, радиолокации, телекоммуникации зачастую используются быстродействующие АЦП. Быстродействующими считаются преобразователи с частотой выборки более 10 Мвыб/с. Как правило, они имеют архитектуру Flash, Folded-Interpolated или pipeline, хотя в последнее время стали появляться и быстрые SAR.

У любого АЦП довольно много различных параметров. Для высокоскоростных преобразователей ввиду специфики их применения особенно важны динамические – SFDR, SNR, IMD. Подробнее об этих и других параметрах можно прочитать [здесь](#).

Первые шаги

Вернемся обратно в 2010 год. Какими наивными мы были! Сейчас уже невозможно сдержать улыбку, просматривая отчёты и презентации, что мы делали тогда. Только с аспирантской скамьи, мы строили честолюбивые планы, как через пару-тройку лет сделаем преобразователь, не менее быстрый и не менее точный, чем у *них*... Ведь опыт разработки быстродействующих АЦП уже был. В нашем портфолио лежал аж 14-битный 100 МГц преобразователь! (Не миландровский.) Правда работал он так:



Вид кристалла и спектр после первой попытки

На выходе этого «преобразователя» вместо синусоиды был изрезанный резкими провалами меандр. Представляете, два года работы – и такое фиаско! SNR 17 дБ вместо расчётных 68. Тем не менее никто не унывал, потому что такие провалы не редки в микроэлектронике. Такова уж специфика, что за каждой схемой, как бы хорошо она не работала на модели, скрывается вопрос — а в «железе» будет работать? Ответить на этот вопрос, и то не наверняка, можно только с опытом.

Итак, мы перевернули страницу и принялись заново разрабатывать 14-разрядный 100 МГц АЦП. Вскоре параллельно с нами начала работать другая, более опытная команда, перешедшая к нам со своими разработками из другой компании. Мы недоумевали тогда, зачем двум командам решать, пусть и разными способами, но одну и ту же задачу? Зачем эта внутренняя конкуренция? Оказывается этим, сами того не подозревая, мы копировали в миниатюре великих мира сего...

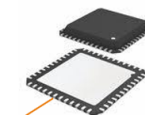
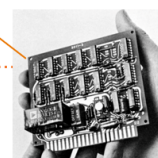
А как там у них?

Нам было любопытно, как развивалось направление быстрых АЦП у лидеров сегмента. Для примера мы взяли компанию Analog Devices, которая еще в 2010 году **удерживала** 48% рынка преобразователей, что больше, чем доля 8 последующих конкурентов вместе взятая. Проанализировав и сопоставив официальные даташиты и научные публикации, мы составили следующий таймлайн:

Ключевые этапы развития быстродействующих АЦП ADI

• 1969	12-бит	100 кГц	модульный			ADC-12U
• 1996	14-бит	10 МГц	КМОП 0,8 мкм	Вилмингтон		
• 1999	10-бит	40 МГц	КМОП 0,35 мкм	Вилмингтон	AD9203	
• 2000	14-бит	100 МГц	К-Биполярный	Гринсборо	AD6644	
• 2000	12-бит	65 МГц	КМОП 0,5 мкм	Вилмингтон	AD9226	
• 2000	12-бит	105 МГц	Би-КМОП 0,6 мкм	Гринсборо	AD9432	
• 2001	14-бит	75 МГц	КМОП 0,35 мкм	Вилмингтон		
• 2005	14-бит	125 МГц	Би-КМОП 0,35 мкм	Гринсборо	AD9445	
• 2010	16-бит	125 МГц	КМОП 0,18 мкм	Вилмингтон	AD9265	
• 2010	16-бит	250 МГц	Би-КМОП 0,18 мкм	Гринсборо	AD9467	
• 2015	14-бит	1,3 ГГц	КМОП 65 нм	Гринсборо	AD9697	
• 2016	14-бит	3 ГГц	КМОП 28 нм	Гринсборо	AD9208	
• 2019	12-бит	10 ГГц	КМОП 28 нм	Вилмингтон+	AD9213	

Мы здесь



В таблице приведены примерный год выхода и технология выдающихся для своего времени АЦП, а также подразделение компании, занимавшееся разработкой. (У нас нет инсайда, поэтому эти данные отражают лишь наше виденье.)

Не разбирая всех причин такого успеха компании, отметим лишь две наиболее важные для нас, инженеров. Во-первых, это полувековое эволюционное развитие, позволившее накопить внушительный «коллективный» опыт. Во-вторых, большие финансовые и ресурсные вложения, свидетельствующие о приоритетности этого направления в компании. Над быстродействующими АЦП одновременно работают два подразделения, в Вилмингтоне и Гринсборо (США), причем в разработке каждой микросхемы может быть задействовано до нескольких десятков инженеров. Основной костяк каждой группы — это инженеры, которые много лет занимаются исключительно этой тематикой. Иногда у обеих команд получались близкие по характеристикам преобразователи, хоть и шли они каждый своим путём. Зачастую и в этом случае обе микросхемы выводились на рынок. Супербыстрые преобразователи последнего поколения оказались «неподъёмными» для какого-то одного подразделения, поэтому обе команды вынуждены были объединить усилия.

Долгая дорога в дебрях

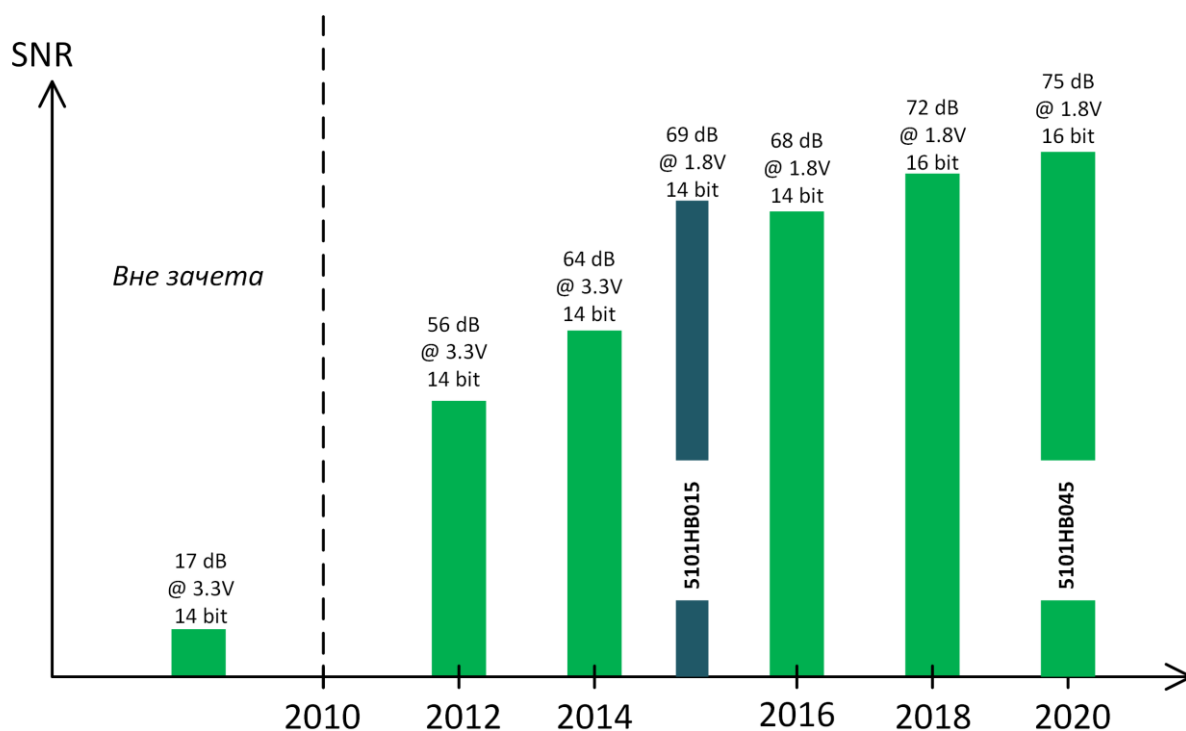
Отметка «мы здесь» на таймлайне сверху демонстрирует, что в области быстродействующих АЦП наше отставание от передовых разработок на сегодня составляет около 10 лет. И это после десятилетней работы! Наверняка кому-нибудь понадобилось бы меньше времени, но именно столько мы потратили, чтобы пробраться сквозь дебри разработки и получить результат, за который не стыдно.

В первое время недостаток опыта и схемотехнических навыков приводил к неоптимальным или даже ошибочным решениям. Учесть все нюансы и найти лучшее решение было затруднительно не только ввиду сложности системы, но и

потому, что симуляторы того времени просто не позволяли промоделировать весь АЦП целиком.

Очень скоро выяснилось, что при таких скоростях на параметры влияет не только качество схемотехники самой микросхемы, но и того, что её окружает – корпуса и печатной платы. Нужно было учиться разрабатывать платы для таких приложений: ведь сначала не получалось даже повторить демо-плату ADI так, чтобы параметры их же АЦП соответствовали даташиту. Индуктивности использовавшегося корпуса тоже пагубно отражались на характеристиках, поэтому пришлось разработать новый корпус с так называемым «донным» контактом (exposed pad), чтобы увеличить количество выводов «земли».

Качество измерений при производстве – ещё один фактор, ограничивающий достигаемые характеристики. При функциональном контроле используется своя оснастка из печатной платы и контактирующего устройства (коробочка, куда вставляется микросхема и прижимается к плате). Предназначенная для больших промышленных тестеров, эта оснастка громоздкая, а значит привносит дополнительные «паразиты» и губит параметры. К примеру, даже у последнего АЦП мы вынуждены ограничивать скорость и диапазон напряжения питания из-за того, что просто не можем подтвердить в условиях цеха параметры, достигаемые этой же микросхемой, но распаянной на компактной плате. Нечего и говорить о том, что достичь высоких характеристик невозможно без современного измерительного оборудования – в первую очередь дорогих генераторов с низким уровнем шума и джиттера, а также высококачественных полосовых фильтров высокого порядка, чтобы отфильтровывать гармоники этих генераторов.



Таймлайн тестовых образцов в ходе разработки микросхемы

За время, что мы работали над этой микросхемой, было сделано 5 запусков. Будучи **fabless** компанией, каждый запуск обходился нам «в копеечку», которую, к тому же, приходилось доставать из своего кармана (из кармана компании, а не из брюк инженеров), так как этот проект не связан с ОКР-ами и финансируется из собственных средств. Помимо цены есть ещё один минус для мелких fabless компаний. Ожидание кристаллов после запуска иногда затягивается до полугода, чем напрочь выбивает из рабочего ритма.

В 2014 году мы готовы были выводить имеющуюся разработку в свет, руководствуясь принципом «на безрыбье и рак — рыба». Микросхема была откровенно «сырая», плохо калибровалась, поэтому хорошо, что к этому моменту вторая наша команда АЦП-шников сделала более хорошую микросхему – её и стали производить под именем **5101HB015**. Чтобы попробовать превзойти этот АЦП, нам пришлось перейти на новую архитектуру и даже другую фабрику.

И вот, наконец, новая микросхема увидит свет!

Коммерческий рынок. Почему высокоскоростные АЦП?

Прежде, чем говорить о получившейся микросхеме, поделимся своими соображениями относительно её возможных перспектив. Коммерческий рынок быстродействующих АЦП довольно специфичен и на нём, как бы это дерзко не звучало, можно попытаться сыграть.

А. Выход на мировой рынок

Наверняка, многие знают: чтобы сделать коммерчески выгодный продукт в микроэлектронике, необходим крупный рынок сбыта. Это связано с окупаемостью R&D, измерительного оборудования, запуска тестовых кристаллов и т.д. Влияет на цену микросхемы и тот факт, что фабрика даёт скидку на пластины при больших объёмах производства. В суровых реалиях российского приборостроения сложно сделать схему, которая бы обеспечила высокий спрос. Тем более, когда существуют такие гиганты как ST, TI, ADI, ну и китайские аналоги любых микросхем, которые можно купить за «3 копейки».

Один из способов решения проблемы – искать высокомаржинальные направления, которые не требуют серьезных вложений в создание программной инфраструктуры. Скажем, FPGA, процессоры и другие цифровые решения помимо собственно выпуска микросхемы требуют создания среды разработки. На то, чтобы сделать её качественной и удобной для пользователя, может уйти гораздо больше времени и денег, чем на сам чип.

С высокоскоростными преобразователями всё иначе. На рынке существуют 3 основные компании, которые развивают направление высокоскоростных АЦП: TI,

ADI и Maxim Integrated (последние две **объявили** о слиянии). Поэтому данный рынок сильно монополизирован. Цены на преобразователи с частотой дискретизации 80 Мвыб/с находятся в районе 80 долларов, что подразумевает серьезную наценку. На habr есть **статья**, в которой хорошо освещена проблема монополии в микроэлектронике.

Б. Ограничение поставки в Россию и Китай

С каждым годом вступают все более жесткие ограничения на поставки ЭКБ в Россию и Китай. Высокоскоростные точные преобразователи попадают в категорию ограничений. Даже потребители из европейских стран при заказе таких микросхем должны заполнять документацию, связанную с **экспортным контролем** продукции двойного назначения. Этот аспект тормозит развитие коммерческих устройств, которые могли бы достичь лучших параметров.

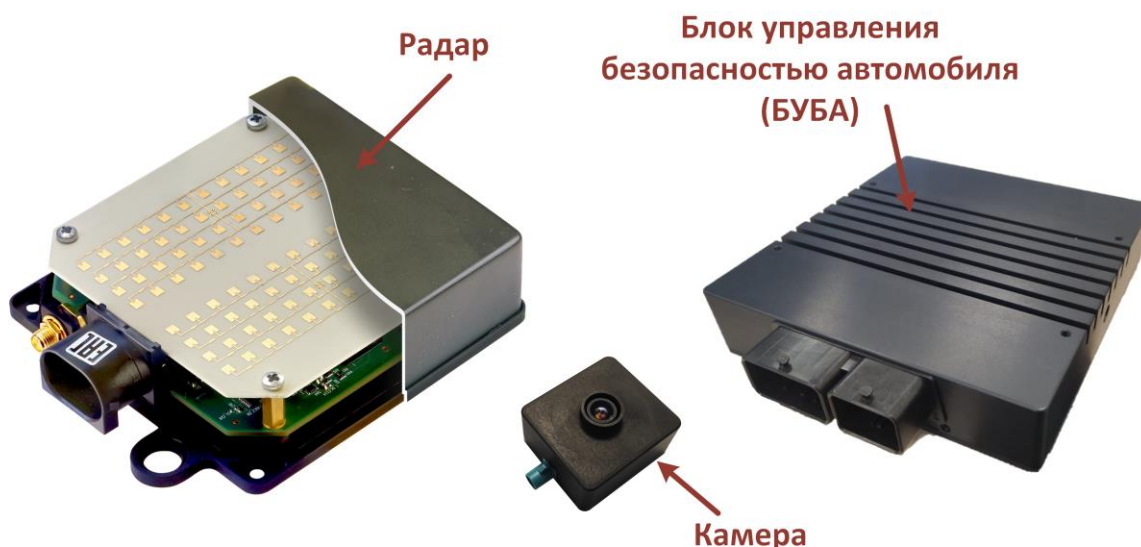
Скриншот страницы товара AD9265BCPZ-80 на сайте Mouser. В таблице цен указаны следующие значения:

Кол-во	Цена
9+	\$78.98
90+	\$76.79
900+	\$65.31
4500+	\$61.01
9000+	\$60.99

Фото с сайтов Mouser, Arrow

В. Улучшение качества собственных продуктов РЭА

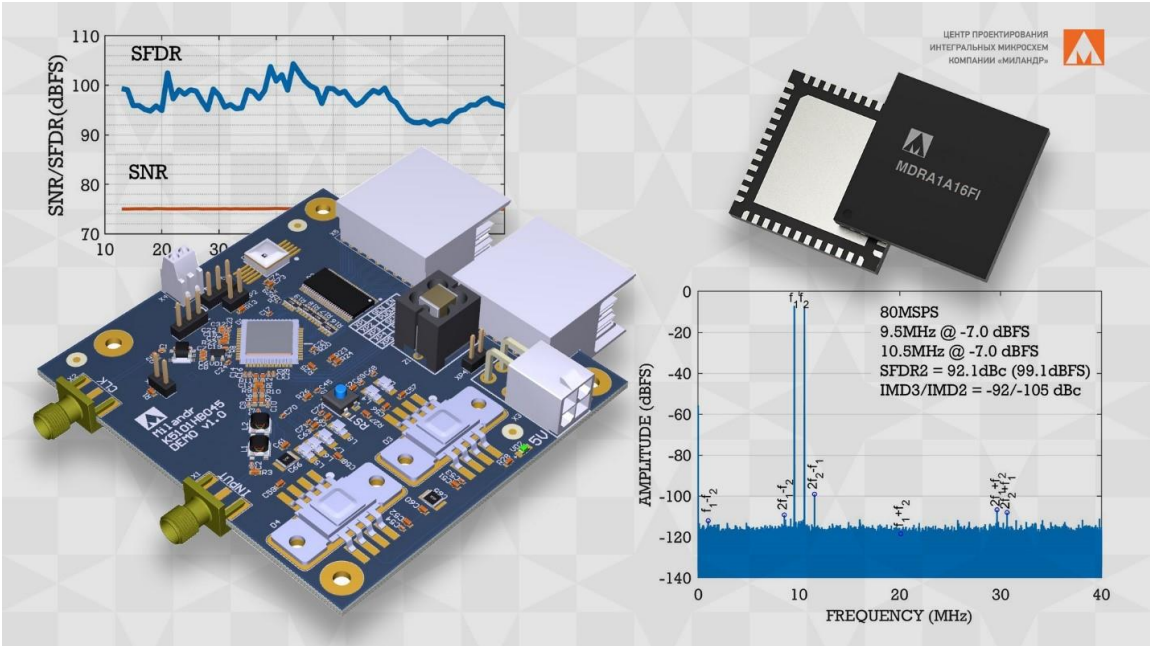
На данный момент у нас разрабатывается система ADAS для помощи водителю. Для обработки данных с радара может использоваться новый АЦП, что позволит существенно поднять точностные параметры системы, а также уменьшить стоимость аппаратуры.



Обобщив все эти пункты, мы решили создать коммерческий вариант микросхемы

(называться будет MDRA1A16FI), цена которой будет ниже, чем у зарубежных аналогов. Образцы в металлокерамическом корпусе можем предоставить всем заинтересованным уже сейчас, а в пластиковом корпусе QFN-48 — в начале 2021 года. Кому интересно, [здесь](#) можно оставить заявку на получение образцов. Пластиковый корпус существенно меньше металлокерамического – всего 7x7x0.85 мм против 11x11x2 мм, и, следовательно, легче и дешевле.

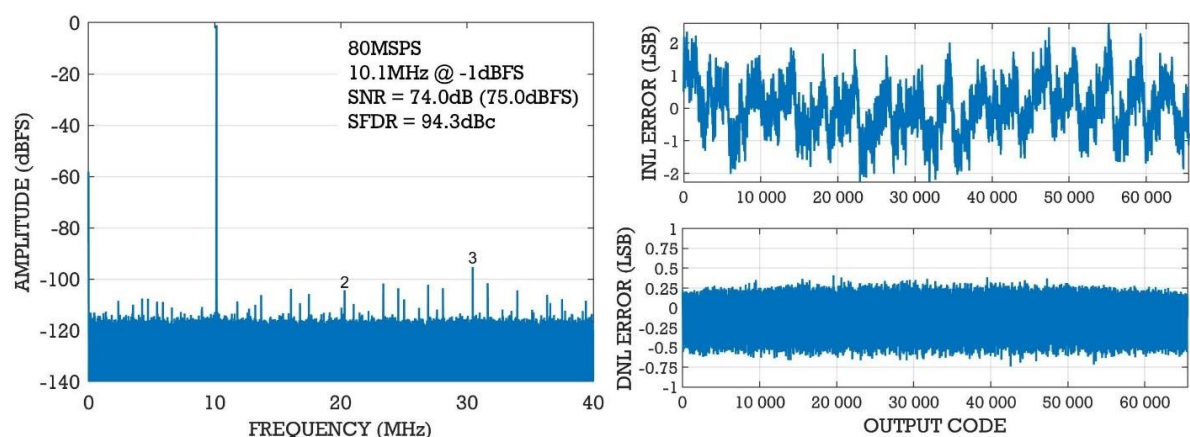
Что в итоге получилось



Теперь, наконец, о самой микросхеме – что в итоге получилось. Микросхема, получившая название **5101NB045**, представляет собой 16-разрядный АЦП с частотой дискретизации 80 Мвыб/с. Её характеристики следующие:

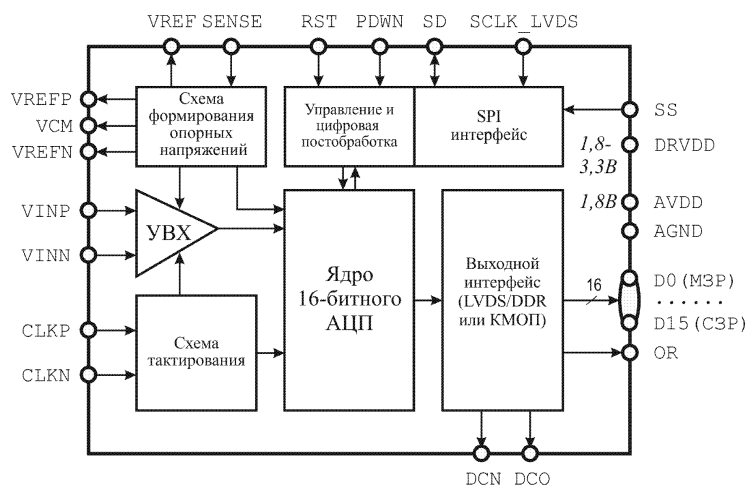
Разрядность, бит	N	16
Напряжение питания, В	Vdd	1.8
Полная шкала, В (п-п)	VFS	2
Частота преобразования, МГц	fs	80
Соотношение сигнал/шум, dBFS (при fIN=10/75МГц)	SNR	75.0 / 73.1
Динамический диапазон, свободный от гармоник, dBc (при fIN=10/75МГц)	SFDR	94 / 83

Интермодуляционные искажения 3-го порядка, dBc (при $f_{IN} \sim 10/75$ МГц)	IMD3	-92 / -80
Интермодуляционные искажения 2-го порядка, dBc (при $f_{IN} \sim 10/75$ МГц)	IMD2	-105 / -83
Интегральная нелинейность, LSB	INL	± 2.7
Дифференциальная нелинейность, LSB	DNL	± 0.75
Джиттер, пс	Tj	0.30
Full Power Bandwidth, МГц	BW	688
Рассеиваемая мощность (полная, в КМОП режиме), Вт	Psup	0.56



Спектр, интегральная и дифференциальная нелинейность

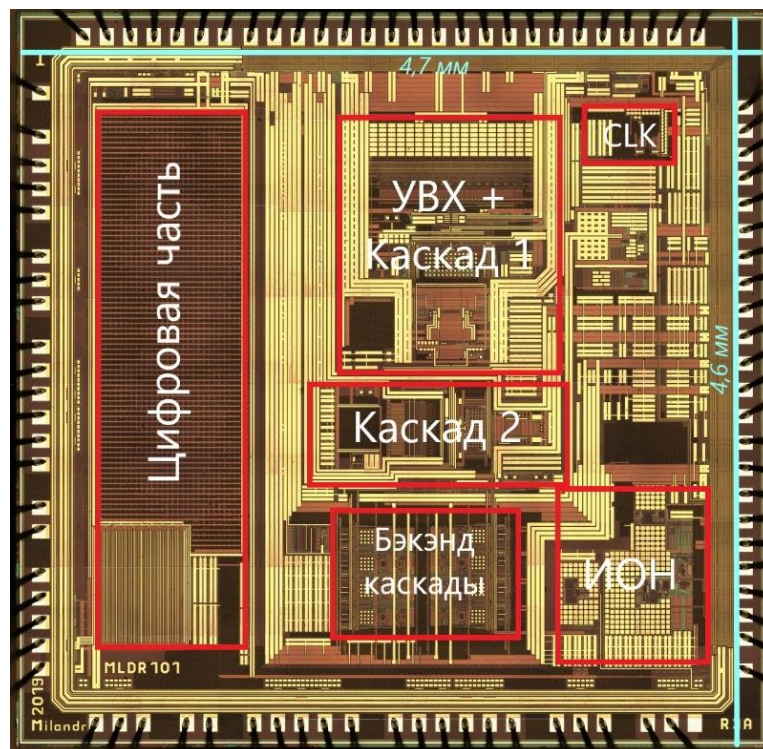
Структурная схема преобразователя:



Микросхема представляет собой одноканальный АЦП конвейерного типа с разрядностью 16 бит. Процесс преобразования происходит в несколько этапов:

1. Входной аналоговый дифференциальный сигнал подаётся через выводы VINP/VINN на входное устройство выборки-хранения (УВХ).
2. Сигнал выборки, сохраненный на емкости УВХ, обрабатывается ядром 16-битного АЦП.
3. Система цифровой постобработки получает цифровой эквивалент обрабатываемой выборки, осуществляет цифровую коррекцию и кодировку в нужный формат (двоичный код со смещением, дополнительный код, код Грея).
4. Итоговый результат выдается на параллельную шину по LVDS или CMOS интерфейсу.

Схемотехническая реализация этого алгоритма с требуемой точностью потребовала значительной площади на кристалле. Поэтому, выполненный по 0,18 мкм КМОП технологии со специальными опциями, чип получился не маленький:



Микросхема обладает множеством режимов работы, которые можно конфигурировать с помощью SPI интерфейса. Все подробности – в спеке. Кстати, мы наконец-то сделали **спецификацию** по западному стандарту (правда англоязычную) – без всяких запутанных «ТУ-шных» таблиц.

Стало лучше?

Во многом, да, если сравнивать с тем же 5101HB015:

- Здесь нет интерливинга. Это означает, что в выходном спектре данного АЦП не будут присутствовать искажения, характерные для преобразователей с

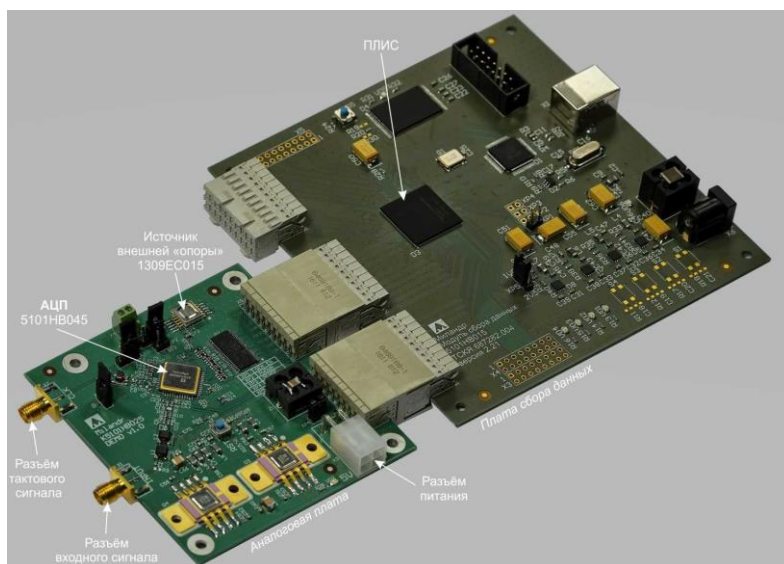
интерливингом, что является существенным плюсом при построении, например, SDR систем.

- Проще пользоваться. Не нужно тратить время на калибровку при запуске или перенастройке микросхемы. Все калибровочные коэффициенты уже записаны во внутреннюю память при производстве.
- Расширенный список доступных интерфейсов вывода данных: LVDS/DDR (с двойной скоростью) и параллельный КМОП 1,8 / 2,5 / 3,3 В.
- Улучшенные динамические показатели SNR [69,5 -> 75] и SFDR [81->94]
- Хорошая статическая линейность: INL 3 (14 бит) -> 2,5 (16 бит), т.е. более, чем в 4 раза лучше.
- Можно подключить внешний источник опорного напряжения 1,25 В и поднять SNR до 76,7 дБ.
- Улучшенный софт для отладочного комплекта.

Что не лучше – так это скорость преобразования (80 вместо 125 МГц) и потребление (560 против 115 мВт).

Отладочный комплект и софт

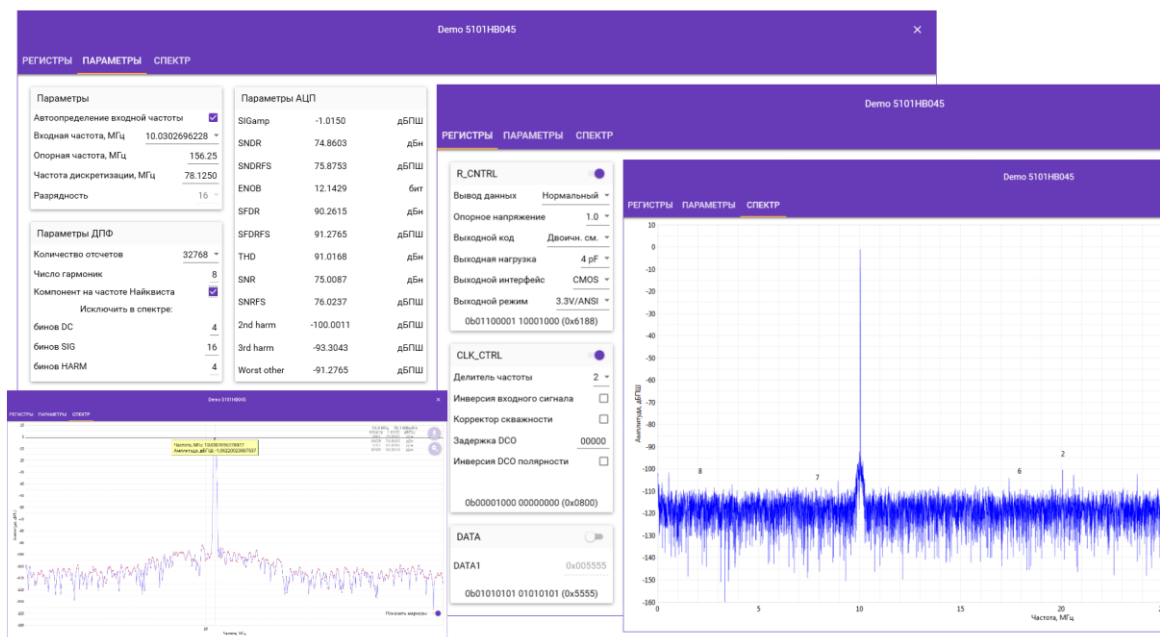
Для того, чтобы попробовать этот АЦП в действии, и при этом не заниматься проектированием печатной платы, мы разработали специальный отладочный комплект. В него входят две платы – аналоговая (собственно АЦП и обвязка) и цифровая (сбор выходных данных). Обе платы соединяются разъемами и питаются от одного стандартного 5 В блока питания.



Используя этот отладочный комплект, можно легко и быстро проверять свои решения при разработке аппаратуры. Достаточно подключить к разъему входной сигнал, всё остальное сделает комплект. На плате присутствует источник тактового сигнала и даже источник внешнего опорного напряжения, чтобы проверить, как

работает система при «опоре» 1,25 В. При желании можно подать свой собственный тактовый сигнал через соответствующий разъем.

Самостоятельно собирать и обрабатывать выходные отсчеты с АЦП тоже не нужно. Мы написали новый софт – быстрый и автономный. Предыдущая версия требовала, к примеру, предустанавливать matlab-библиотеки, что достаточно неудобно. Программа умеет конфигурировать АЦП, снимать и выгружать с него данные, строить спектр и вычислять по нему характеристики. Данное ПО поставляется в составе отладочного комплекта. Так же, его можно скачать [здесь](#). Кому интересны комплекты, вот [ссылка](#).



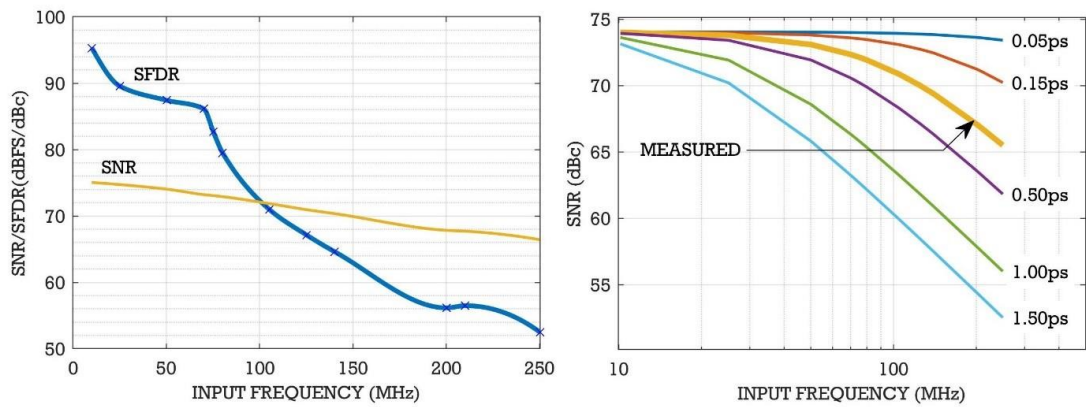
Скриншоты отладочного ПО

Работа над ошибками

Да, мы сделали большой рывок, но часть характеристик всё еще не дотягивает до параметров импортных микросхем. Сравним основные характеристики существующих 16 разрядных АЦП с частотой дискретизации 80 Мвыб/с.

Сравнение параметров

Недостатком нашей микросхемы является деградация линейности и ухудшение шума при работе в т.н. "undersampling" режиме (информацию об этом добавили в предыдущую [публикацию](#)), т.е. когда полоса входного сигнала находится во второй и выше зоне Найквиста. Это требуется, например, в приложениях с [непосредственной дискретизацией ПЧ](#). Эта деградация происходит из-за относительно высокого собственного джиттера и нелинейности входного УВХ, которая начинает проявляться примерно с 60 МГц.



Зависимость динамических характеристик от частоты входного сигнала

Если, однако, вы обрабатываете сигналы с частотой до 60-70 МГц, то по динамическим параметрам 5101NB045 смотрится в этой таблице, на наш взгляд, вполне достойно.

Что будет дальше?

Поделимся планами по развитию наших высокоскоростных АЦП. Мы полны решимости сделать еще один цикл (надеемся, он пройдет быстрее, чем за 10 лет) и «дотянуть» характеристики нашей микросхемы до уровня аналогов. Если конкретно, то:

1. поднять SNR до 78 дБ, частоту дискретизации до 125 Мвыб/с.
2. Уменьшить собственный джиттер, увеличить линейность УВХ, и улучшить таким образом SFDR и SNR на высоких частотах входного сигнала.
3. Добавить дизеринг для работы с маленькими сигналами (более подробно можно узнать об этом в [статье](#) на habr).

Приоритетом для себя мы определили высокую линейность и низкий шум.

Вторая наша группа разработчиков приоритетом для себя видит высокую скорость преобразования. В её планах:

1. В течение 2021 года вывести на рынок АЦП скоростью до 400 Мвыб/с в двух версиях: со встроенным входным буфером и без. Данный АЦП будет также работать в двухканальном режиме с частотой выборки до 200 Мвыб/с каждый.
2. Этот же АЦП в двухканальном режиме оснастить последовательным выходным интерфейсом Serial LVDS. У схемы с таким интерфейсом существенно меньше выводов. Значит трассировка платы, снятие и обработка данных сильно упрощается. Это заметное преимущество, особенно для многоканальных АЦП.

Уже был запуск тестовых образцов, они показали хорошие параметры, однако потребовали доработки, которая сейчас активно проводится.

Заключение

Итак, за 10 лет мы существенно продвинулись, но впереди ещё много работы. Тяжело догонять столь быстро и давно развивающиеся компании, особенно когда в R&D схем вкладывают большие ресурсы. Как уже упоминалось, направление скоростных АЦП у нас финансируется за счет собственных средств, и они, увы, сильно ограничены. Но все мы видим большое будущее в этом направлении. Будем действовать, руководствуясь нашим негласным девизом: *«Таких гигантов как ADI в АЦП-строении нам не переплюнуть, но как следует плюнуть в этом направлении — уже хорошо»*.