

# Сверхскоростные АЦП и усилители класса ТНА компании Hittite Microwave и их применение

Владимир ДЬЯКОНОВ,  
д. т. н., профессор  
vpdyak@yandex.ru

При построении современных цифровых систем и устройств различного назначения, а также цифровых измерительных приборов широко применяются конвертеры данных. К ним, прежде всего, относятся аналого-цифровые преобразователи ADC. В настоящее время микросхемы таких преобразователей выпускает целый ряд крупных фирм мирового значения, например Analog Devices, Texas Instruments, National Semiconductor и др. Однако по-прежнему очень остро стоит проблема разработки и производства сверхскоростных преобразователей данных. Американская фирма Hittite Microwave лидирует в разработке таких преобразователей на основе новейших полевых, GaAs и гетеропереходных структур СВЧ полупроводниковых приборов. Эти разработки реализованы в виде сверхминиатюрных монолитных интегральных схем.

## Экономичные скоростные АЦП

Большинство АЦП, выпускаемых компанией Hittite Microwave, — это экономичные (с потребляемой от источника питания мощностью до 100 мВт) и скоростные (от 20 до 80 Мбит/с) монолитные микросхемы класса SMPS. Параметры ряда таких микросхем представлены в таблице 1. Потребляемая от источника питания мощность указана для номинального напряжения питания. Уровень шума SNR и значение SFDR (spurious-free dynamic range) [2] даны при максимальной скорости преобразования.

Микросхемы этой группы имеют следующие характеристики:

- Один (single), два (dual), четыре (quad) или восемь (octal) каналов (channels).
- Достаточно высокое (от 10 до 13 бит) разрешение.
- Высокая (до 65/80 Мбит/с) скорость преобразования.

Таблица 1. Параметры экономичных скоростных микросхем АЦП

Микросхема	Структура	Разрядность, бит	Скорость, Мбит/с	Мощность рассеивания, мВт	SNR, дБ FS	SFDR, дБс	Корпус
HMCAD1102	octal ch.	13/12	80	59 (на канал)	70,1	77	LP9E
HMCAD1101	octal ch.	13/12	65	51 (на канал)	72,2	82	LP9E
HMCAD1050-80	dual ch.	13/12	80	102	72	77	LP9E
			65	85	72,6	81	
HMCAD1050-40	dual ch.	13/12	40	55	72,7	81	LP9E
			20	30	72,2	85	
HMCAD1051-80	single ch.	13/12	80	60	72	77	LP6HE
			65	50	72,6	81	
HMCAD1051-40	single ch.	13/12	40	33	72,7	81	LP6HE
			20	19	72,2	85	
HMCAD1040-80	dual ch.	10	80	78	61,6	75	LP9AE
			65	65	61,6	77	
HMCAD1040-40	dual ch.	10	40	43	61,6	81	LP9AE
			20	24	61,6	81	
HMCAD1041-80	single ch.	10	80	46	61,6	75	LP6HE
			65	38	61,6	77	
HMCAD1041-40	single ch.	10	40	25	61,6	81	LP6HE
			20	15	61,6	81	

- Ультранизкая потребляемая от источника питания мощность (от 15 до 105 мВт).
- Низкий уровень шума.
- Низкое (1,8 В номинал) напряжение питания.
- Низкое (1,7–3,6 В) управляющее напряжение на входах/выходах.
- Параллельный CMOS-выход.

Микросхемы этого типа предназначены для использования в миниатюрных измерительных приборах и цифровых осциллографах (включая USB-приставки [4]), системах коммуникаций, устройствах обработки видеосигналов и изображений, медицинской электронике и т. д. Типичным примером недорогого микросхем этого класса

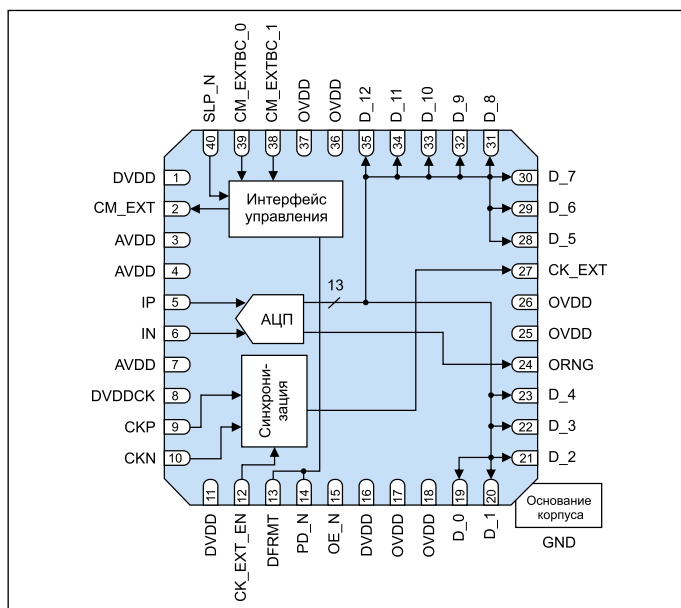


Рис. 1. Функциональная диаграмма микросхемы АЦП HMCAD1051-80

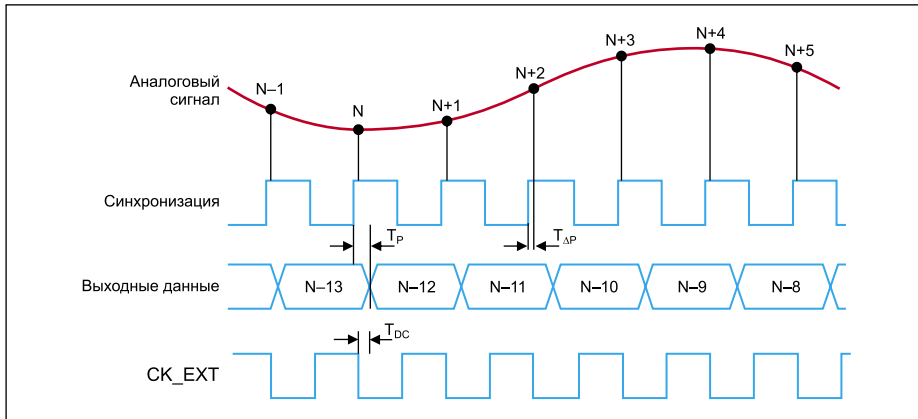


Рис. 2. Временная диаграмма работы АЦП HMCAD1051-80

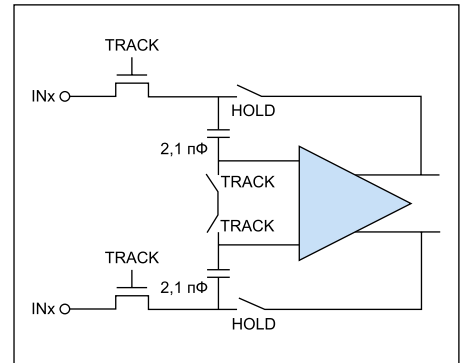


Рис. 3. Типовая схема включения источника входного сигнала к АЦП HMCAD1051-80 с коммутатором на входе

является одноканальный АЦП HMCAD1051-80 (рис. 1) со скоростью преобразования 65 или 80 Мбит/с. Микросхема выполнена в миниатюрном корпусе LP6Н с размером 6×6 мм, имеющем 40 выводов.

Микросхема отличается не только простотой функциональной диаграммы (тонкости архитектуры АЦП на ней, естественно, опущены), но и простой и наглядной временной диаграммой работы, показанной на рис. 2.

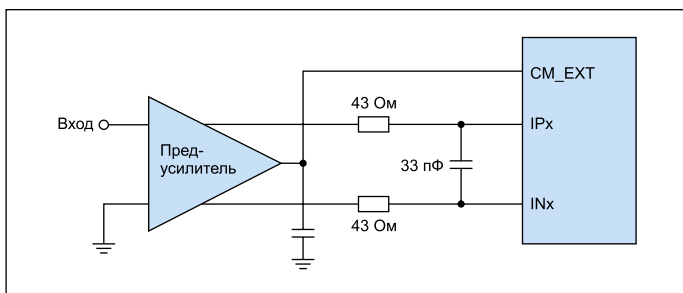


Рис. 4. Пример включения несимметричного входного сигнала

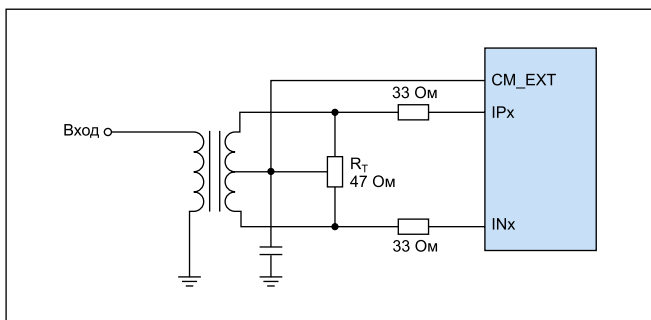


Рис. 5. Пример включения несимметричного входного сигнала с разделительным трансформатором на входе

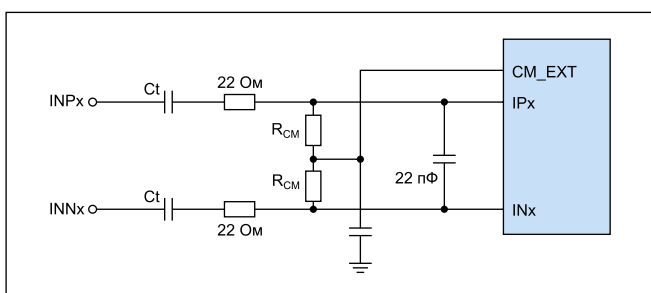


Рис. 6. Пример симметричного подключения входного сигнала

### Схемы подключения к АЦП входных сигналов

Для преобразования в цифровой сигнал входные аналоговые сигналы могут быть разного типа — с наличием постоянной составляющей и без нее, симметричные и несимметричные и т. д. Фирма Hittite Microwave рекомендует несколько типовых схем подключения входных сигналов к АЦП. Все подключения должны быть выполнены очень тщательно.

Типовая схема включения источника входного аналогового сигнала к АЦП микросхемы HMCAD1051-80 представлена на рис. 3. Это типичная схема выборки сигнала на основе коммутатора на полевых транзисторах с запоминающим конденсатором малой емкости (2,1 пФ). Такое построение позволяет довести максимальную частоту выборки до 80 Мбит/с.

Пример включения несимметричного входного сигнала с нулевой нижней граничной частотой (сигнал с DC) показан на рис. 4. В этой схеме используется буферный операционный усилитель, относящийся к классу полных дифференциальных усилителей, то есть имеющих дифференциальные вход и выход. Он должен быть согласован с параметрами АЦП и иметь малое время установления выходного сигнала.

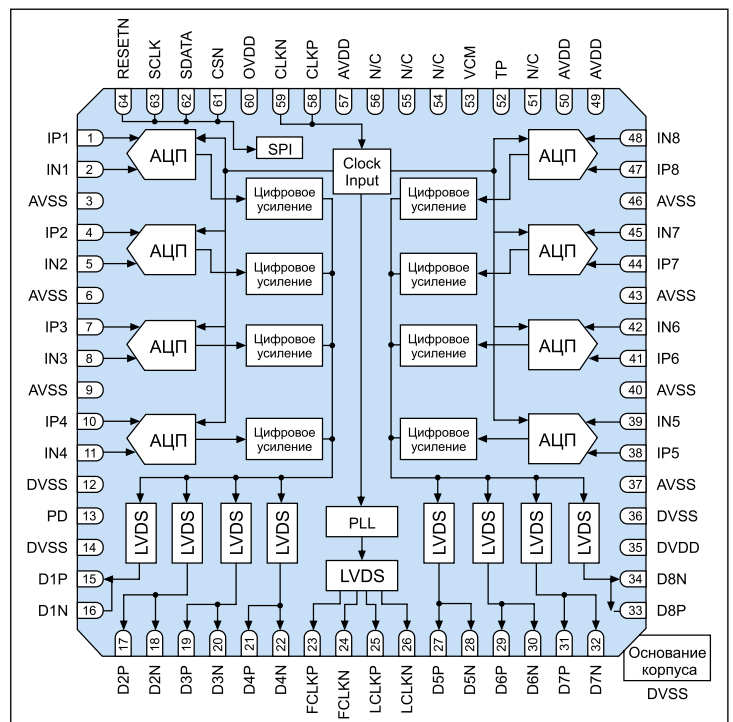


Рис. 7. Функциональная диаграмма 8-канального АЦП — микросхемы HMCAD1102



Рис. 8. Печатная плата для тестирования микросхемы АЦП HMCAD1051-80

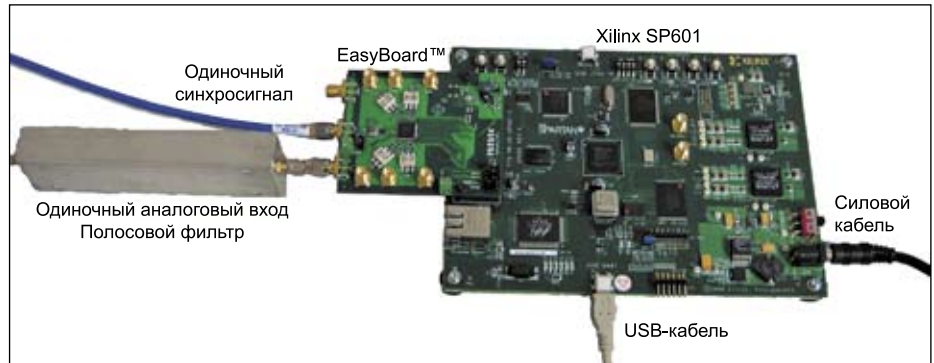


Рис. 9. Система для тестирования микросхем АЦП фирмы Hittite Microwave на основе двух печатных плат

При использовании АЦП для преобразования радиочастотных сигналов часто применяется трансформаторная схема подключения входного сигнала к АЦП (рис. 5). Трансформатор обеспечивает гальваническую развязку и переход от несимметричной подачи входного сигнала к симметричной, реализованной в самом АЦП.

Еще одна схема симметричного подключения входного сигнала к входу АЦП показана на рис. 6. Симметричная схема обеспечивает дифференциальное подключение, которое отличается высокой степенью подавления помех.

Некоторые микросхемы Hittite Microwave содержат в одном корпусе несколько одноканальных АЦП (см. начало табл. 1). Так, микросхема HMCAD1102 (рис. 7) содержит восемь АЦП, выполненных в корпусе LP9E. Каждый канал имеет потребляемую от источника питания мощность в 59 мВт. Естественно, она возрастает в 8 раз при работе всех восьми каналов. Подобные микросхемы применяются для построения многоканальных измерительных приборов или сетей связи.

### Платы для тестирования микросхем АЦП

Для проведения тестирования микросхем АЦП компания Hittite Microwave выпускает специальные платы. Вид одной из них (для микросхемы одноканального АЦП — HMCAD1051-80) показан на рис. 8. Для каждого типа микросхемы АЦП поставляется своя тестирующая плата.

Выпускается также общая плата (рис. 9), подключаемая к компьютеру. К ней подключается тестирующая плата того или иного АЦП, а уже потом — источник входного сигнала.

Для настройки микросхем АЦП и проведения их тестирования компания Hittite Microwave выпускает специальное программное обеспечение. На рис. 10 показано окно программы тестирования АЦП. В этом окне осуществляется выбор тестируемой микросхемы и платы ее тестирования.

Окно измерений основных параметров тестируемой микросхемы приведено на рис. 11. Оно зависит от выбранного для тестирования преобразователя. В правой части окна пред-

ставлены графики преобразуемого сигнала и частотная зависимость шума АЦП. В документах для АЦП есть множество данных, характеризующих работу микросхем АЦП и полезных при проектировании различных устройств на их основе.



Рис. 10. Окно программы тестирования микросхем Hittite Microwave

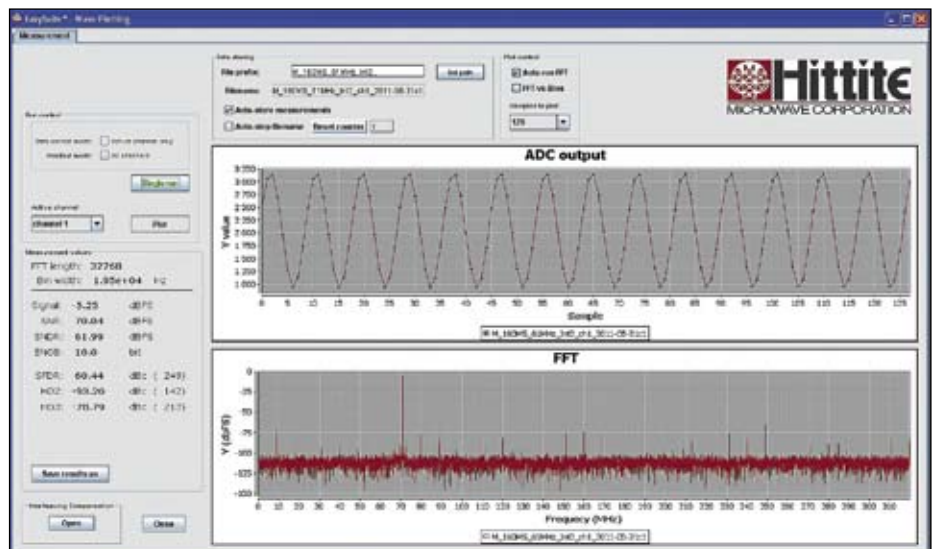


Рис. 11. Окно измерений и графика преобразуемого сигнала

### Сверхскоростные АЦП осциллографических сигналов

Несколько микросхем компании Hittite Microwave — это сверхскоростные АЦП, предназначенные для массовых цифровых осциллографов (в том числе выпускаемых в виде USB-приставок к ПК [4]) с полосой пропускания примерно до 250 МГц и анализаторов спектра. Полоса частот цифрового осциллографа  $F_\delta$  связана с частотой дискретизации сигнала  $F_D$  простым выражением, вытекающим из теоремы об отсчетах (Котельникова):  $F_\delta < F_D/2$ . Однако этот вывод чрезмерно идеализирован, поскольку основан на интерполяции сигналов между отсчетами сложным в реализации интерполирующим фильтром Котельникова (иногда именуемым фильтром типа  $\sin(x)/x$ ).

На практике  $F_\delta$  от 3 до 10 раз меньше частоты дискретизации (выборки). Эти данные относятся к одному каналу осциллографа. Если число каналов равно  $N$ , то полоса частот осциллографа снижается еще в  $N$  раз. Для улучшения динамических характеристик АЦП применяются специальные усилители класса ТНА (Track-and-Hold Amplifier). Микросхемы таких усилителей описаны ниже.

Большинство массовых цифровых осциллографов имеют разрешение по вертикали 8 бит ( $2^8 = 256$  значений уровня исследуемого сигнала). На такое разрешение ориентирована микросхема HMCAD1511 LP7DE. Она выполнена в корпусе QFN 48 (LP7D) с размером  $7 \times 7$  мм. Ее основные параметры представлены в таблице 2. Микросхема имеет несколько режимов работы, которые отличаются числом каналов и скоростью дискретизации. Максимальная скорость преобразования достигает 1 Гбит/с в одноканальном режиме работы.

**Таблица 2.** Параметры микросхемы HMCAD1511 LP7DE с 8-битовым разрешением

Разрядность, бит	Скорость, Мбит/с	Количество каналов	Мощность, мВт	SNR, дБ FS	SFDR, дБс
8	1000	1	710	49,8	49/64
	500	2			44/63
	250	4			57/70

**Примечание.** Значения параметра SFDR (spurious-free dynamic range) указаны для двух случаев: including/excluding interleaving spurs [2].

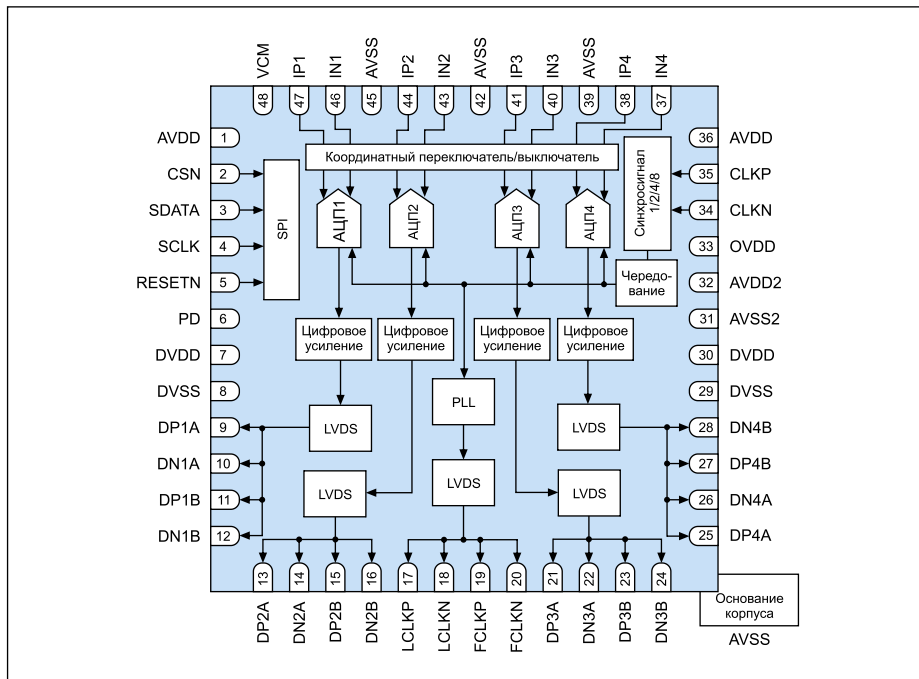
HMCAD1511 LP7DE имеет встроенную коррекцию сдвига уровня, к которому чувствительны осциллографические устройства с полосой исследуемых частот, начинающейся с нуля (постоянного тока DC). Микросхема имеет малое (1,8 В) напряжение питания. Управляющие сигналы CMOS-логики — от 1,6 до 3,6 В. Выход — последовательный, типа VDS/RS DS.

Функциональная диаграмма микросхемы HMCAD1511 представлена на рис. 12. Массовые цифровые и USB-осциллографы имеют обычно 1, 2 или 4 одновременно работающих канала. Поэтому микросхема имеет коммутатор класса Cross Point и четыре АЦП (ADC1–ADC4).

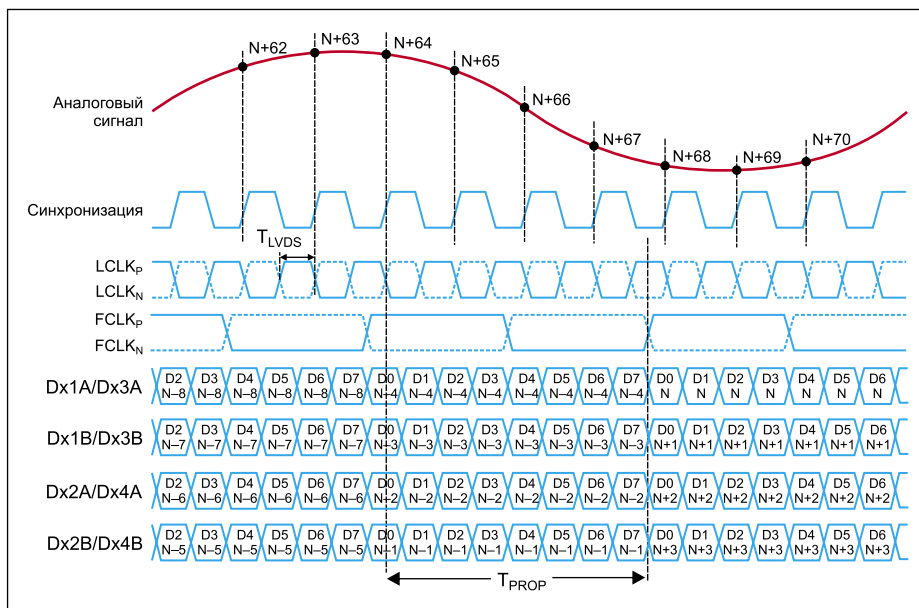
Управляющая часть микросхемы обеспечивает распределение управляющих и тактовых сигналов всех АЦП в соответствии с временной диаграммой работы микросхемы. Заметим, что она разная в зависимости от числа используемых каналов. На рис. 13 представлена временная диаграмма работы в двухканальном режиме работы (ее полезно сравнить с диаграммой работы одноканального АЦП — рис. 2).

Микросхема HMCAD1510 имеет вдвое меньшую скорость дискретизации, но она потребляет соответственно и меньшую мощность. Параметры этой микросхемы представлены в таблице 3. HMCAD1510 выполнена в корпусе LP7DE.

При разрешении в 8 бит осциллограмма цифрового осциллографа с АЦП имеет заметные «ступеньки». Поэтому у некоторых моделей цифровых осциллографов разрядность приходится повышать. «Ступеньки» перестают быть отчетливо видны при разрядности 12 бит и выше.



**Рис. 12.** Функциональная диаграмма микросхемы HMCAD1511



**Рис. 13.** Временная диаграмма микросхемы HMCAD1511 при работе двух каналов

**Таблица 3.** Параметры микросхемы HMCAD1510 с 8-битовым разрешением

Тип	Скорость, Мбит/с	Количество каналов	Мощность, мВт	SNR, дБ FS	SFDR, дБс
single ch.	500	1	295	49,8	49/65
dual ch.	250	2	95	49,8	59/69
quad ch.	125	4	295	49,7	60/69

**Таблица 4.** Параметры микросхемы HMCAD1520 с 12-битовым разрешением

Режим работы	Разрядность, бит	Полоса пропускания, МГц	Количество каналов	Мощность, мВт	SNR, дБ FS	SFDR, дБс
HS1	12	640	1	490	70	60/75
HS2		320	2			60/78
HS4		160	4			60/78
Precision	14	105/80	4	603/530	74/75	83/85

Выпускается микросхема 12/14-битового АЦП HMCAD1520. Ее параметры представлены в таблице 4. Микросхема выполнена в корпусе LP7DE. Максимальная полоса частот достигает 640 МГц в одноканальном

режиме работы. Особенность этой микросхемы — режимы Precision с разрядностью 14 бит и полосой пропускания 105 или 80 МГц в одноканальной работе.

Функциональная диаграмма и тип корпуса у этой микросхемы подобны таковым для микросхемы HMCAD1511. Чертеж корпуса LP7DE представлен на рис. 14.

На рис. 15 дана временная диаграмма работы микросхемы HMCAD1511 при работе со всеми четырьмя каналами.

Для тестирования микросхемы HMCAD1511 поставляется печатная плата EKIT01-HMCAD1520, показанная на рис. 16. Она используется в составе измерительной системы на двух печатных платах (рис. 9). Полную спецификацию платы можно найти в PDF-файле с описанием Data Sheet этой микросхемы, размещенном на сайте фирмы [1].

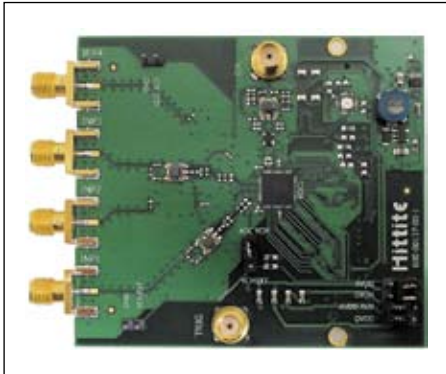


Рис. 16. Печатная плата тестирования микросхемы HMCAD1511

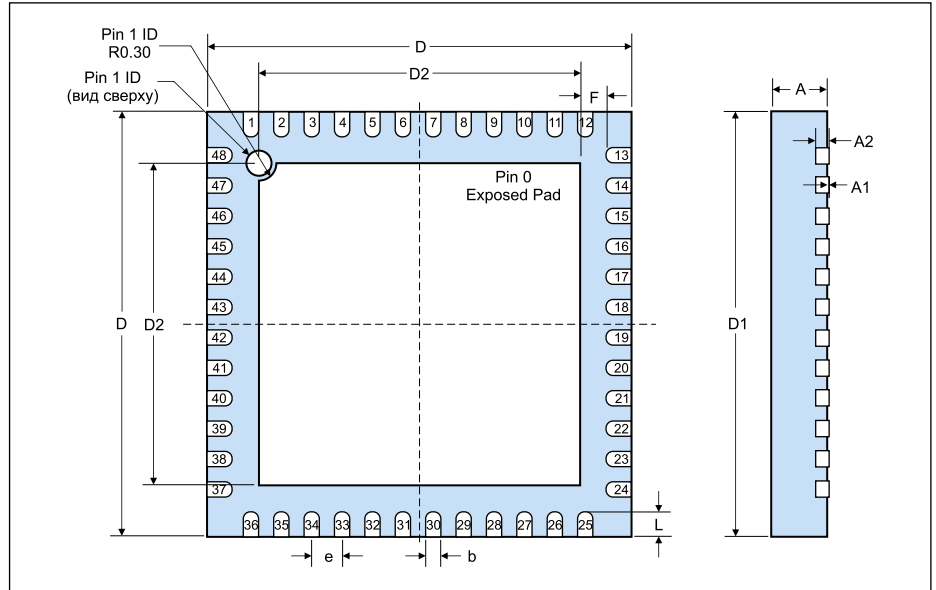


Рис. 14. Чертеж корпуса LP7DE

### Сверхширокополосный усилитель ТАН — HMC660

В состав микросхем раздела Data Converters фирмы Hittite Microwave входит сверхширокополосный усилитель класса ТНА — HMC660LC4В. Он предназначен для высококачественного отслеживания входного

сигнала (track) и его четкой фиксации (hold). Микросхема имеет полосу частот основного тракта 0,02–4,5 ГГц, максимальную частоту преобразования 3 ГГц и уровень среднеквадратического шума на выходе 0,95 мВ RMS.

Функциональная диаграмма HMC660LC4В показана на рис. 17. Микросхема выполнена на основе сверхскоростных гетеропереход-

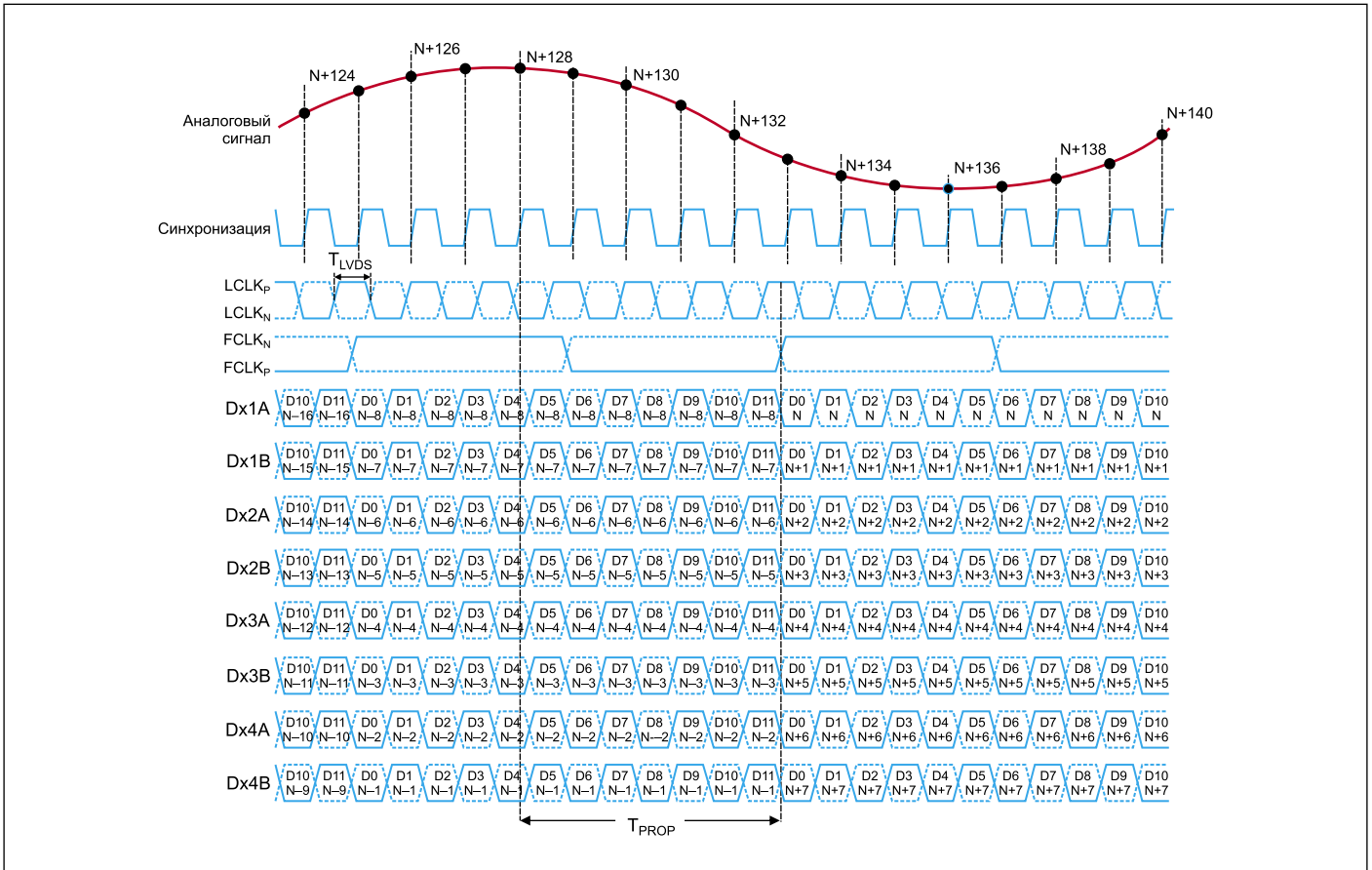


Рис. 15. Временная диаграмма работы микросхемы HMCAD1511

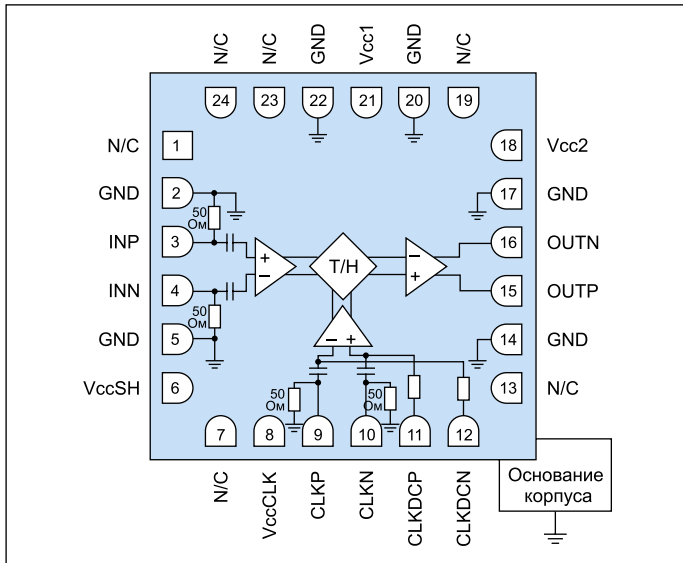


Рис. 17. Функциональная диаграмма микросхемы HMC660LC4B — усилителя ТАН

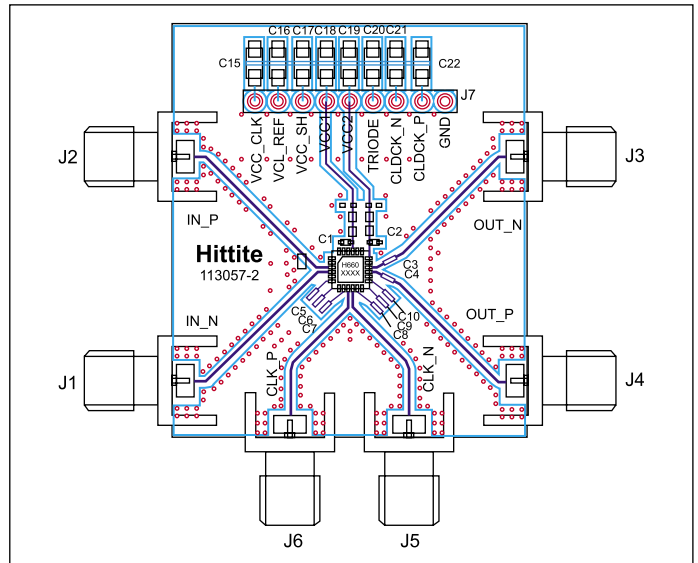


Рис. 19. Печатная плата схемы рис. 18

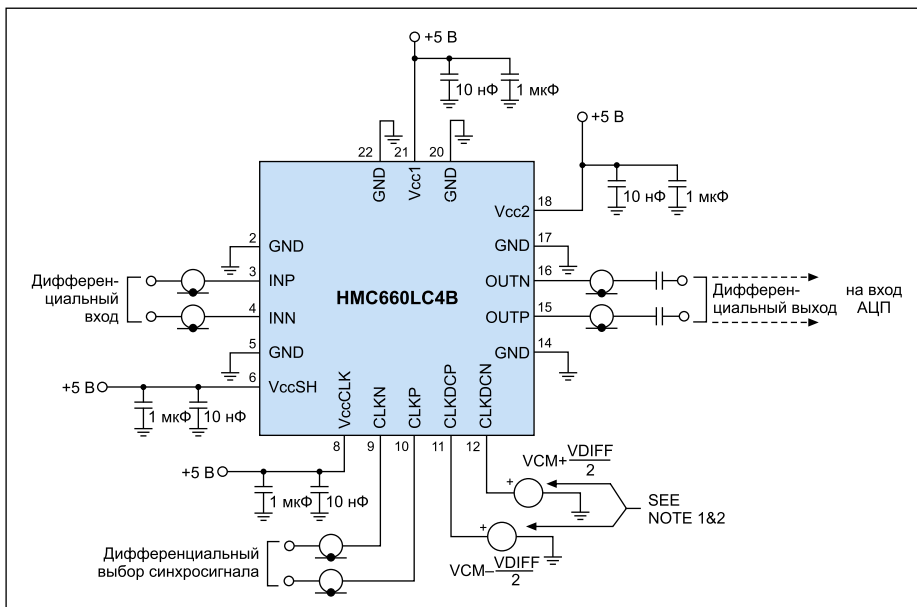


Рис. 18. Типовая схема включения усилителя HMC660LC4B

ных GeSi биполярных транзисторов в корпусе LC4B с очень малой паразитной индуктивностью выводов. Особенность архитектуры — применение дифференциальных входа и выхода основного и тактового сигнала. Это дает высокую скорость передачи сигналов по линиям связи и высокую помехозащищенность.

Эта микросхема предназначена для уменьшения динамических погрешностей АЦП, различных радиочастотных применений, использования в цифровых запоминающих осциллографах, системах демодуляции цифровых сигналов, СВЧ-приемниках, высокоскоростных пиковых детекторах, радарных системах и др. HMC660LC4B имеет полосу частот входного сигнала до 4,5 ГГц при максимальном уровне сигнала 1 В. Максимальная частота дискретизации — до 3 ГГц. Типовая схема включения микросхемы показана на рис. 18.

Конструкция печатной платы для реализации этой схемы с миниатюрными коак-

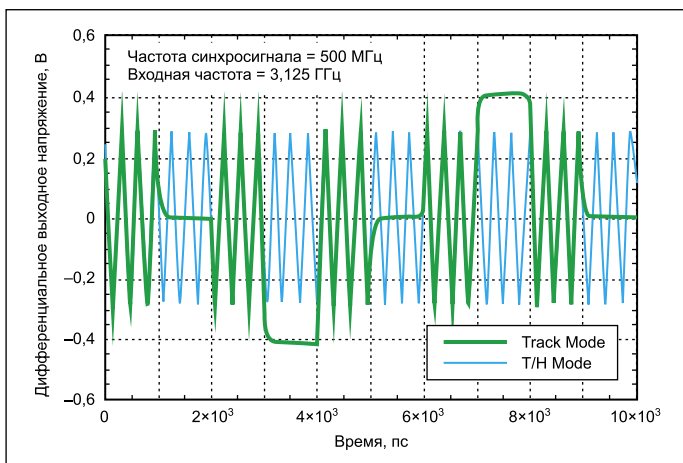


Рис. 20. Осциллограммы сигнала с частотой 3,125 ГГц и тактовых импульсов с частотой 500 МГц

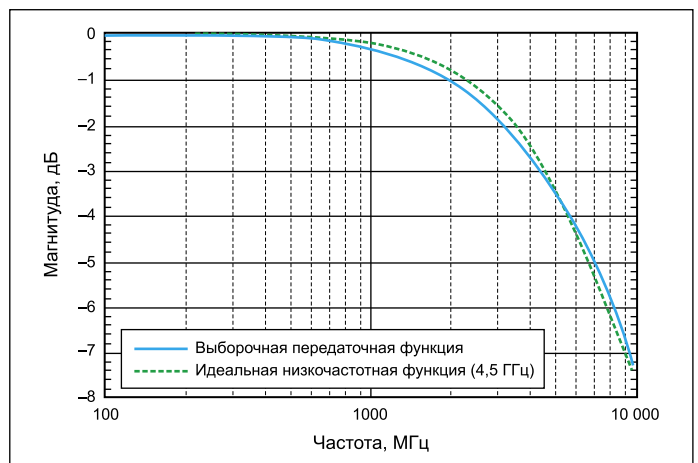


Рис. 21. Амплитудно-частотная характеристика микросхемы HMC660LC4B и идеального низкочастотного 4,5-Гц фильтра низких частот

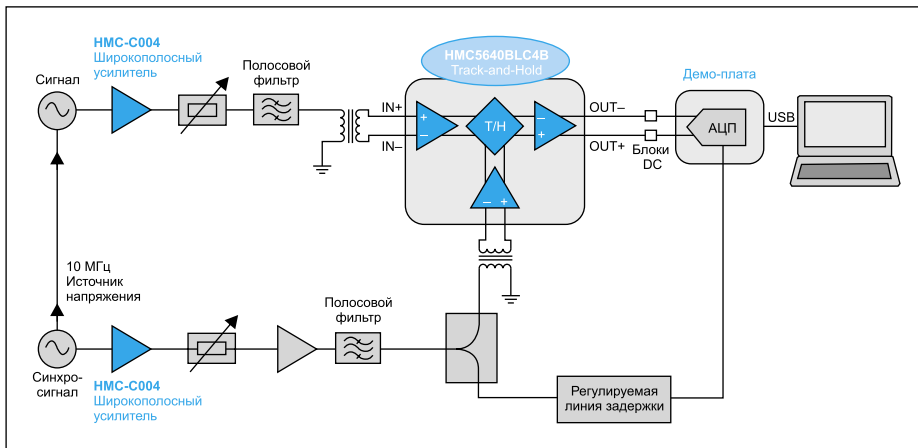


Рис. 22. Установка для тестирования микросхемы HMC660LC4B

сиальными разъемами SMA для дифференциальных сигналов представлена на рис. 19. Применены бескорпусные конденсаторы с очень малой паразитной индуктивностью выводов.

На рис. 20 показаны осциллограммы сигнала с частотой 3,125 ГГц и тактовых импульсов с частотой 500 МГц. А на рис. 21 — амплитудно-частотные характеристики HMC660LC4B и идеального низкочастотного 4,5-Гц фильтра низких частот.

Для всестороннего тестирования микросхемы HMC660LC4B компания рекомендует установку, которая представлена на рис. 22.

Печатная плата тестирования показана на рис. 23. Ее подключение к плате с установленной микросхемой осуществляется отрезками широкополосных коаксиальных 50-омных кабелей. Плата тестирования подключается к источнику питания и через USB-порт — к персональному компьютеру. Он обеспечивает построение заданных характеристик микросхемы.

Микросхема HMC660LC4 характеризуется большим числом параметров: S-параметрами малосигнального режима работы, искажениями по второй и третьей гармоникам, ча-

стотными характеристиками коэффициента передачи, шумовыми параметрами и т. д. Большинство этих характеристик приведено

в подробном описании микросхемы, которое есть на сайте компании.

На рис. 24 показана зависимость фундаментальной амплитуды сигнала от времени групповой задержки и параметра SFDR, снятая с помощью установки, изображенной на рис. 22.

### Применение микросхемы HMC5640BLC4B для улучшения характеристик сверхскоростных АЦП

Для улучшения характеристик особо сверхскоростных АЦП предназначена монолитная микросхема усилителя класса THA HMC5640BLC4B, позволяющая работать с входными сигналами в диапазоне частот до 18 ГГц [3]. Ее можно использовать с наиболее высокоскоростными АЦП, например ADS5400 компании Texas Instruments (1 Гвыборок/с, 12 бит), ADC12D1600 National

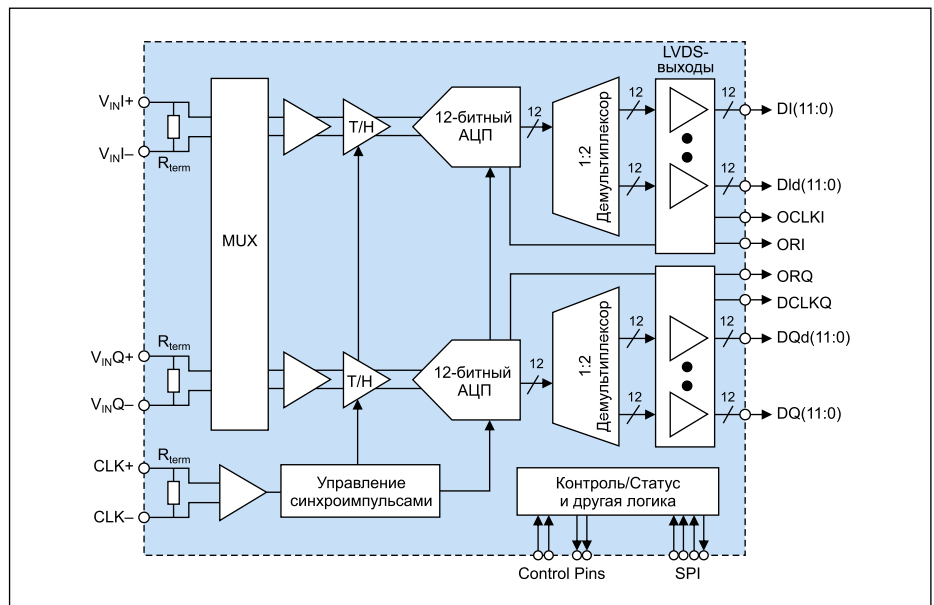


Рис. 25. Функциональная диаграмма сверхскоростного АЦП ADC12D1600 фирмы National Semiconductor

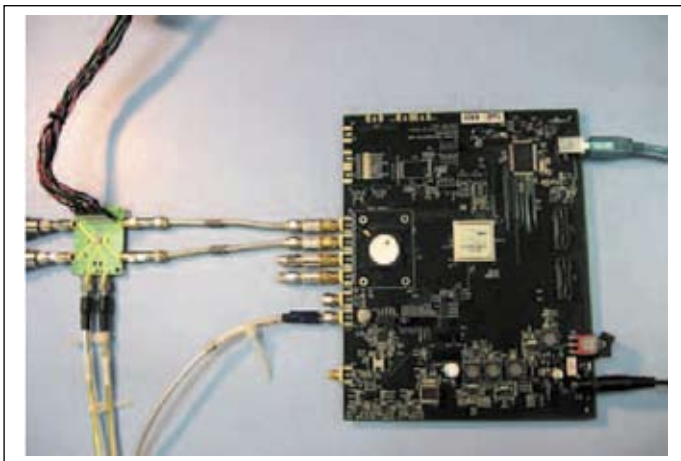


Рис. 23. Плата тестирования микросхемы HMC660LC4B

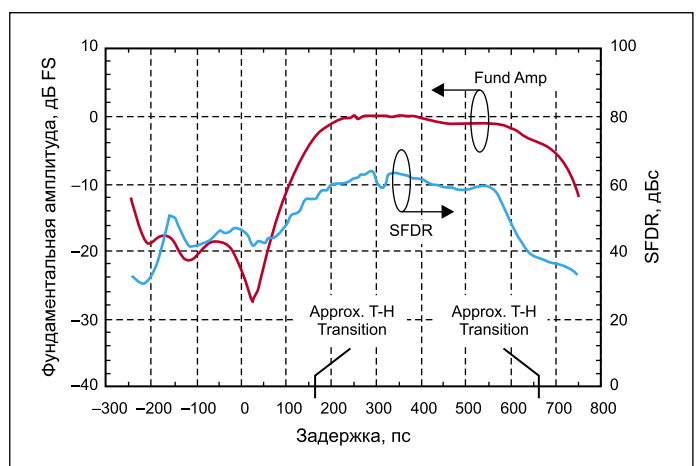


Рис. 24. График зависимости фундаментальной амплитуды сигнала от времени групповой задержки и параметра SFDR

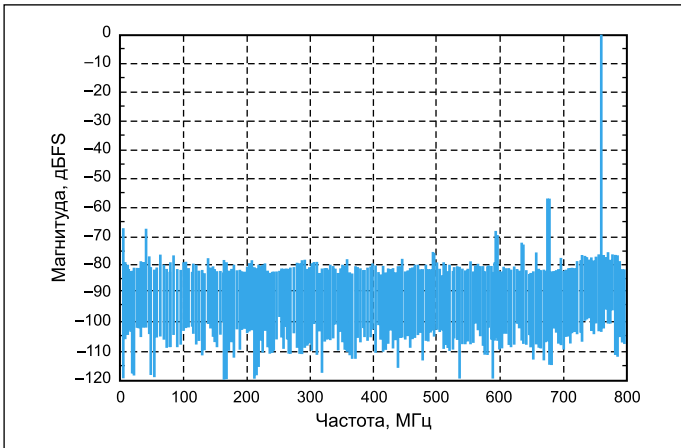


Рис. 26. Спектр шума АЦП ADC12D1600 с усилителем HMC5640BLC4B на входе

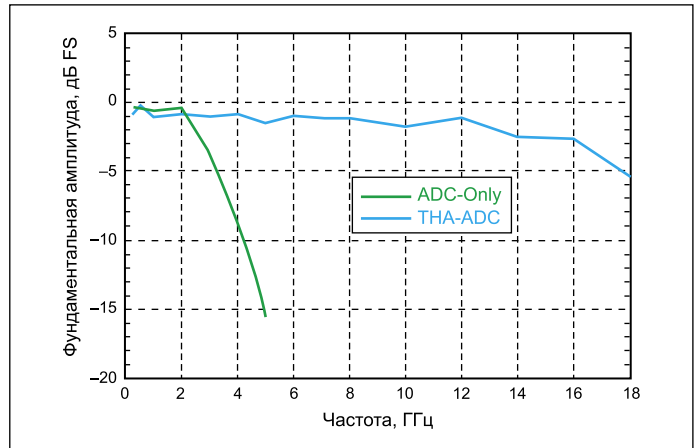


Рис. 27. Зависимость магнитуды от частоты для АЦП ADC12D1600 и этого АЦП с усилителем HMC5640BLC4B на входе

Semiconductor (1,6 Гвыборок/с, 12 бит, 2 канала) и др.

Так, в документе [3] приведен интересный пример улучшения характеристик сверхскоростного АЦП ADC12D1600 фирмы National

Semiconductor. Это 12-битный АЦП с частотой выборки до 2 и даже 3,2 Гвыборок/с (в режиме объединения каналов). Его функциональная диаграмма (рис. 25) похожа на такую у наиболее скоростных АЦП компании

Hittite Microwave. Однако этот АЦП выполнен в большом корпусе BGA-292 с почти тремя сотнями выводов, а рассеиваемая им мощность составляет 3,8 Вт. Такова цена за сверхвысокое быстродействие этого АЦП.

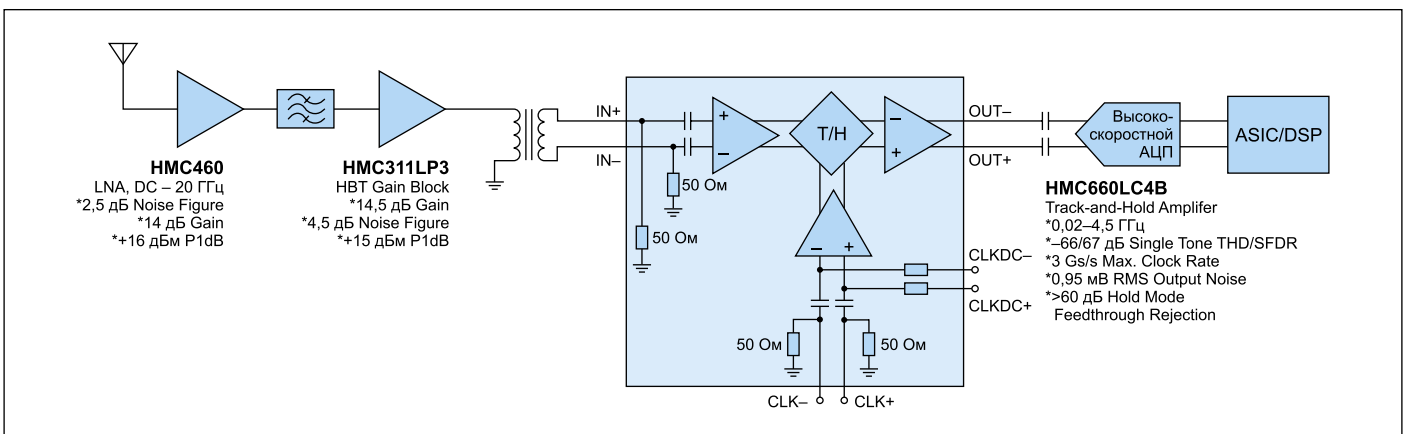


Рис. 28. Блок-схема СВЧ-радиоприемника прямого усиления

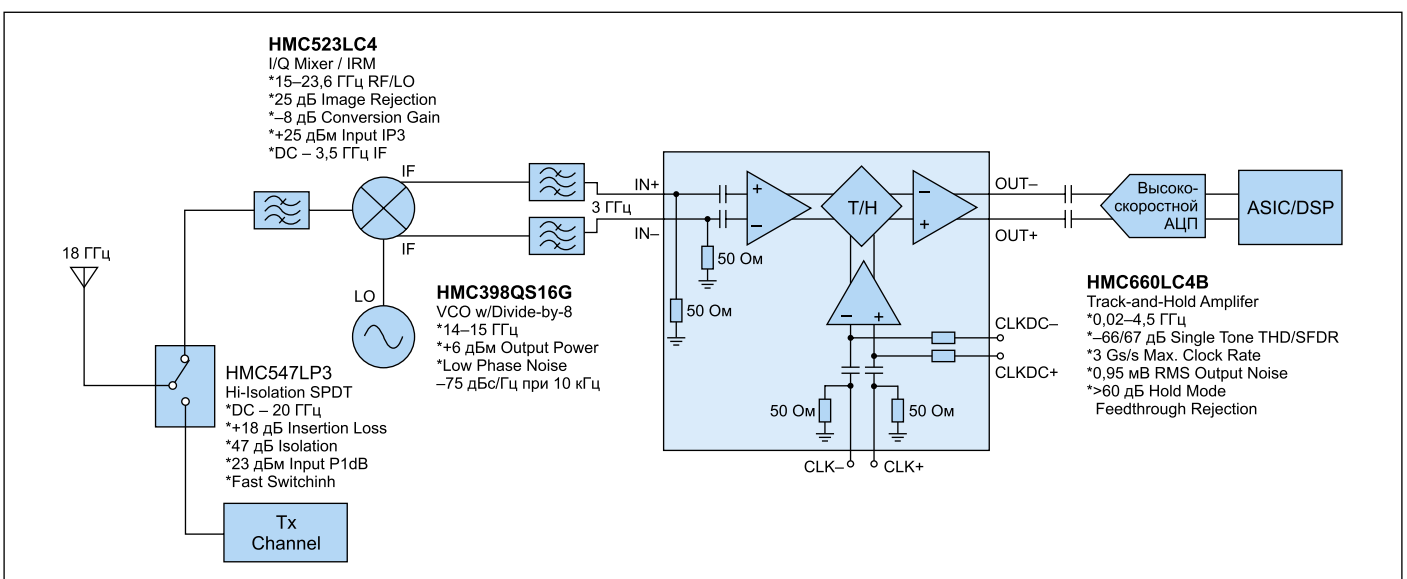


Рис. 29. Блок-схема СВЧ супергетеродинного радиоприемника на микросхемах Hittite Microwave



На рис. 26 показан спектр шума АЦП ADC12D1600 с усилителем HMC5640BLC4B на входе. Этот спектр получен при скорости преобразования АЦП 1,5 Гвыборков/с и при частоте его входного сигнала 4,04 ГГц. Пик на частоте 759 МГц соответствует компоненте с частотой ( $3F_{\text{sign}} - 8F_{\text{clk}}$ ). Для построения спектра использовались средства спектрального анализа (быстрого преобразования Фурье) матричной системы компьютерной математики MATLAB [5]. Спектр отличается высокой равномерностью.

Особое внимание следует обратить на зависимость магнитуды от частоты для самого АЦП ADC12D1600 и этого АЦП с усилителем HMC5640BLC4B на входе (рис. 27). Малосигнальная полоса частот АЦП при применении усилителя заметно расширяется, что свидетельствует о существенном улучшении динамических показателей работы АЦП.

### Применение микросхемы HMC660LC4B в приемниках СВЧ-сигналов

Более известную микросхему HMC660LC4B рекомендуют и для ряда других применений, например приемников СВЧ-сигналов. На рис. 28 показана функциональная схема

приемника СВЧ-усиления прямого преобразования. Входная часть устройства построена на двух СВЧ-усилителях фирмы Hittite Microwave, между которыми установлен полосовой фильтр, формирующий избирательность и полосу рабочих частот приемника. Центральное место занимает усилитель HMC660LC4B. Сигнал с его выхода подается на АЦП и после преобразования в цифровую форму подвергается обработке в соответствии с назначением приемного устройства.

Функциональная схема более совершенного супергетеродинного радиоприемника СВЧ-сигналов дана на рис. 29. Этот широкополосный радиоприемник СВЧ-сигналов с кодоимпульсной модуляцией имеет промежуточную среднюю частоту 3 ГГц, которая поступает в микросхему HMC660LC4B и АЦП для получения цифрового сигнала, подлежащего последующей обработке.

### Заключение

Монолитные микросхемы аналого-цифровых преобразователей компании Hittite Microwave отличаются высочайшей скоростью преобразования и очень малыми габаритами и массой. Это позволяет применять их в портативной аппаратуре, чему способствует и малая

потребляемая от источника питания мощность. Обширная номенклатура таких микросхем рассчитана на их применение в массовых цифровых запоминающих осциллографах, ручных и стационарных измерительных приборах, таких как цифровые настольные и ручные мультиметры, в радиоприемных устройствах СВЧ-диапазона, радарных устройствах, системах спутникового телевидения и связи и т. д. Существенное улучшение динамических характеристик АЦП, в том числе и других фирм, обеспечивают монолитные микросхемы сверхширокополосных усилителей класса TNA. ■

### Литература

1. [www.hittite.com](http://www.hittite.com)
2. General Guidelines & Procedures for Using the HMC5640BLC4B with an Analog-to-Digital. Hittite Microwave.
3. Converter Bandwidth & Performance Improvements of High Speed Analog-to-Digital Converters Using the HMC5640BLC4B. Hittite Microwave.
4. Дьяконов В. П. Широкополосные стробоскопические USB-осциллографы — приставки к персональным компьютерам // Компоненты и технологии. 2011. № 10.
5. Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс, 2011.