

О точных измерителях дальности от компаний Texas Instruments и Silicon Radar

Константин ГОРБАТОВ
kvg@efo.ru

С освоением миллиметрового диапазона длин волн появилась возможность создавать точные измерители дальности, используя ЛЧМ-сигнал с базой в несколько гигагерц, что позволяет получать сантиметровое разрешение по дальности. Микросхемы для диапазона 77 ГГц выпускают несколько компаний. Это NXP с набором микросхем MR2001 и MR3003; Infineon с RTN7735, RRN7745 и Texas Instruments с чипами IWR1443 и IWR1642. Первые две компании ограничивают доступ к информации о своих микросхемах подписанием соглашения о неразглашении. Таким образом, для широкого круга пользователей предназначены лишь микросхемы диапазона 76–81 ГГц от Texas Instruments, а также приемопередатчики компании Silicon Radar для диапазона частот 119–126 ГГц, рассмотренные ранее [1, 2]. Обе компании выпускают отладочные платы, сравнение которых и приводится в данной статье.

Диапазон 77 ГГц предназначен как для автомобильного, так и для промышленного применения. В последнем

случае подразумевается действие радиолокационного измерителя в закрытом объеме. В настоящее время в России разрешена без-

лицензионная работа устройств в диапазоне 122–123 ГГц при излучаемой мощности не более 5 Вт.

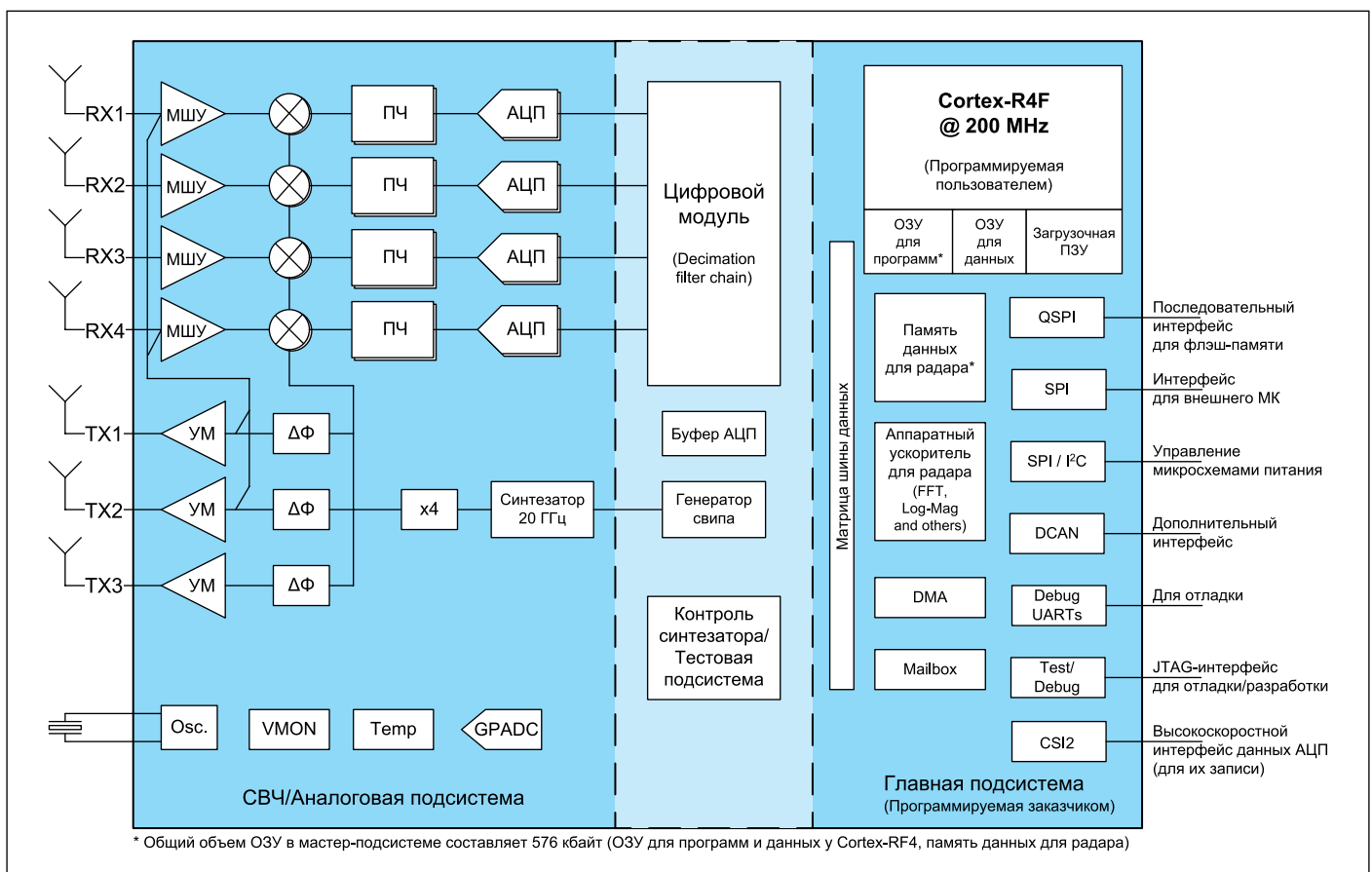


Рис. 1. Структурная схема IWR1443

Компания Texas Instruments предлагает отладки IWR1443BOOST и IWR1642BOOST [3]; компания Silicon Radar — SiRad Simple и SiRad Easy [4].

Рассмотрим первые из названных отладок обоих производителей.

Отладка IWR1443BOOST компании Texas Instruments

Отладка размером 65×81 мм построена на основе одноименного чипа. Его структурная схема представлена на рис. 1. Микросхема отличается высокой степенью интеграции и условно состоит из двух частей — RSS (Radar Sub System) и MSS (Master Sub System). Первая отвечает за формирование СВЧ-свипа, прием и передачу СВЧ-сигналов и оцифровку полученных данных. В микросхеме реализовано четыре приемных и три передающих канала. На передачу могут одновременно работать только два. Вторая часть — это, по сути, процессор Cortex-R4F, действующий на частоте 200 МГц и имеющий ряд встроенных функций для обработки радиолокационных сигналов.

Идеология работы IWR1443 подразумевает загрузку прошивок в обе части, RSS и MSS, которая выполняется при подаче питания, поскольку сам кристалл не содержит энергонезависимой памяти. В соответствии с выбранным режимом загрузка происходит либо по интерфейсу QSPI из внешней Flash, либо с помощью дополнительного МК по интерфейсу SPI. При этом прошивка RSS недоступна для модификации пользователем, в отличие от прошивки MSS, способной генерироваться из пользовательского исходного кода посредством Code Composer Studio. Конфигурирование RSS-части производится с применением библиотечных функций вида MMWave_xxx из кода MSS-части. Формат команд подробно описан в документе “AWR1xx_Radar_Interface_Control”, который входит в состав DFP [5].

Отладка IWR1443BOOST, показанная на рис. 2, помимо IWR1443 содержит печатные антенны, загрузочную Flash-память S25FL116, четырехканальный импульсный преобразователь напряжения LP87524, малозащумящие стабилизаторы TPS7A8101, TPS7A8801 и микроконтроллер TM4C129, который выполняет функции драйвера XDS110 для обмена с ПК и целей отладки. На одном USB-порте он реализует два COM-порта, один из которых предназначен для управления на скорости 115 200 bps, а второй — для передачи данных на скорости 921 600 bps. Преобразователи напряжения необходимы, так как IWR1443 требует четыре различных вида питания: 1,2/1,35/1,8/3,3 В.

Обмен данными IWR1443 может производиться по нескольким последовательным интерфейсам: SPI (921600 bps), I²C (400 kbps), CAN (1Mbps) и MIPI-CSI2 (900 Mbps). Последний позволяет выводить лишь сырые

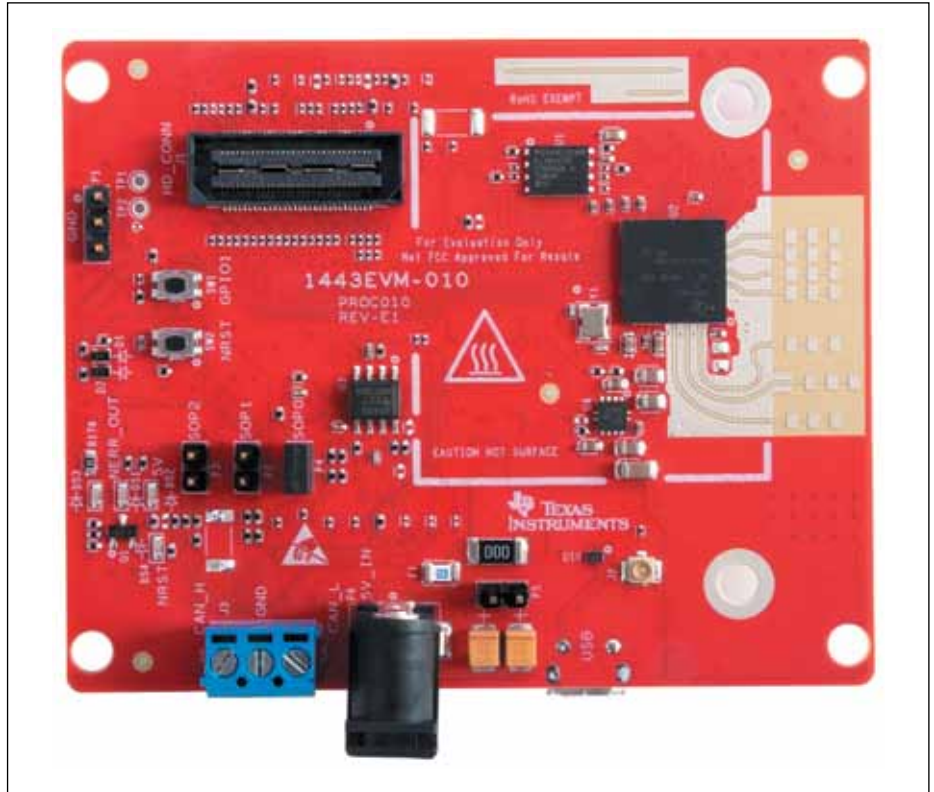


Рис. 2. Плата IWR1443BOOST

оцифрованные данные со встроенных АЦП. Микросхема имеет также шесть внешних линий АЦП и три линии ввода/вывода для свободного использования.

Для IWR1443 указана максимальная ширина свипа 4 ГГц, что соответствует разрешению по дальности 37,5 мм. В отладке же используется 3721,8 МГц максимум, что дает разрешение по дальности 40,3 мм.

Определение дальности до объекта с помощью IWR1443BOOST

Компания Texas Instruments предоставляет несколько демонстрационных примеров, два в составе SDK [6], после инсталляции они находятся в его подкаталоге `..\packages\ti\demo\xwr14xx`. Дополнительные примеры предоставляются в `mmWave Training` [7], после инсталляции на ПК они размещены в подкаталогах `..\demos` и `..\labs`. Часть из них используют GUI на стороне ПК под MATLAB runtime R2016b (9.1), который ставится лишь на 64-разрядную ОС, а часть приложения написана под GUI_Compiler.

Для простейшего тестирования отладочной платы возьмем пример `mmWave Demo`, описанный в подкаталоге `SDK ..\docs\mmwave_sdk_user_guide.pdf`. Для этого обратимся к готовым прошивкам: `xwr12xx_xwr14xx_radarss.bin` для RSS-части (собственно, она одна и та же для всех примеров) и `xwr14xx_mmw_demo_mss.bin` для MSS-части (она всегда разная и требует соответствующего

ПО для ПК). Прошьем обе в IWR1443 с помощью утилиты UniFlash. Для визуализации радарных данных предоставляется `mmWave_Demo_Visualizer` [8], который можно запу-

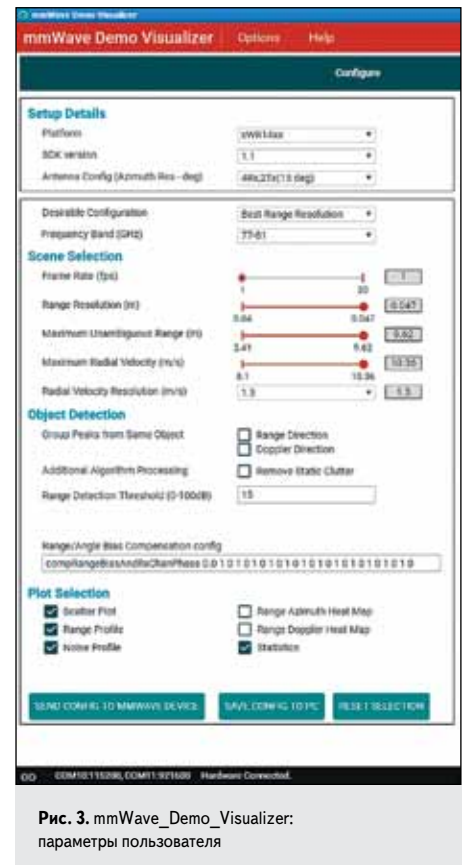


Рис. 3. mmWave_Demo_Visualizer: параметры пользователя

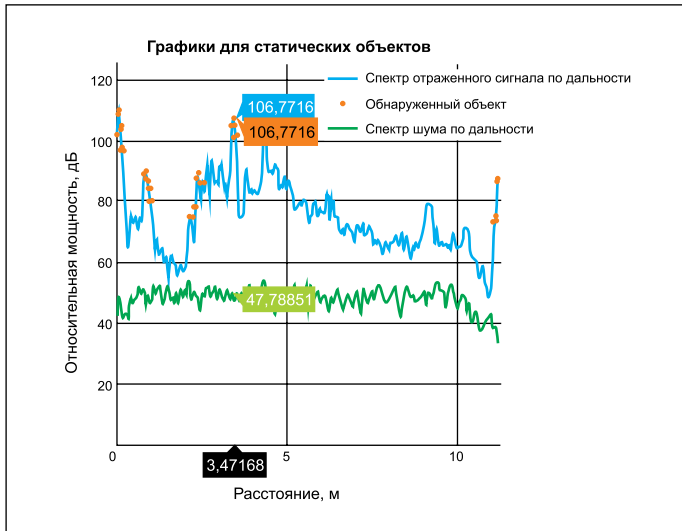


Рис. 4. mmWave_Demo_Visualizer: спектр

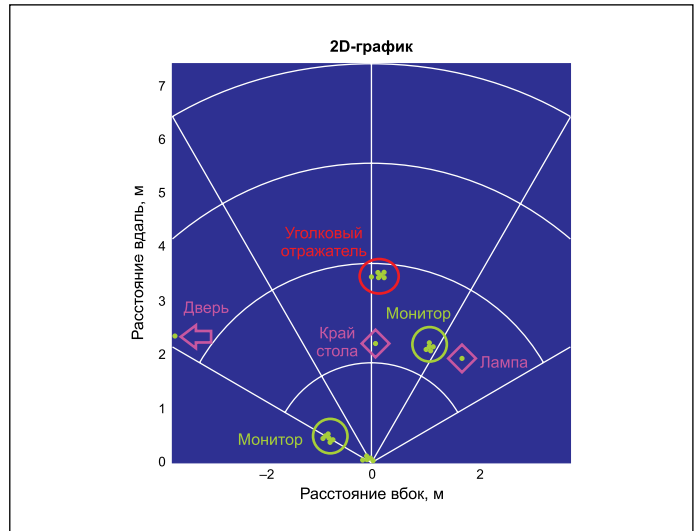


Рис. 5. mmWave_Demo_Visualizer: 2D радарное изображение

Таблица 1. mmWave_Demo_Visualizer: внутренние параметры

Параметр	Значение
Начальная частота, ГГц	77
Скорость перестройки, МГц/мкс	100
Количество точек в свипе	240
Число свипов во фрейме	32
Частота оцифровки, МГц	7,5
Полоса ЛЧМ, ГГц	3,2
Число фреймов/с	1
Число передающих антенн	2
Число приемных антенн	4
Свободное время, мкс	962 201
Время обработки, мкс	10 125
Время передачи данных в ПК, мкс	26 145

стить в браузере либо установить из галереи приложений TI [9]. Проведем оценку радарного модуля в условиях офиса. В качестве отражающего объекта используем треугольный уголкового отражателя, изготовленный из фольгированного стеклотекстолита, со стороны ребра 11 см и ЭПР $101,56 \text{ м}^2$ на частоте 122 ГГц и установим его на столе на расстоянии около 3 м. Сконфигурируем пользовательские параметры, как показано на рис. 3. Периодичность фрейма 1 раз в 1 с обеспечивает стабильность работы программы, при более высокой скорости она часто зависает. Мощность отраженного сигнала в зависимости от расстояния показана на рис. 4 синей линией, зеленая линия отображает шумы приемника, расстояние до уголкового отражателя измерено как 3,47 м с разрешением по дальности 4,7 см. Двухмерное радарное изображение офисного окружения показано на рис. 5. Используемые параметры для сбора данных отображаются рядом с графиками на дополнительных вкладках, наиболее важные сведены в таблицу 1. При ширине ЛЧМ 3200 МГц крутизна перестройки составляет 100 МГц/мкс, что означает время одного свипа 32 мкс. Фрейм содержит 32 таких свипа, соответственно, их суммарная длительность со-

ставляет $32 \times 32 \text{ мкс} = 1,024 \text{ мс}$. Аналогичная цифра получается, если исходить из частоты оцифровки и числа точек. Примечательно, что холостой режим работы встроенного процессора составляет 962,201 мс; время обработки данных — 10,125 мс; а время передачи в сторону ПК — 26,145 мс, в сумме это даст 998,471 мс. Поскольку время одного цикла сбора данных составляет 1 с, значит, на сбор данных тратится 1,529 мс, то есть примерно в 1,5 раза больше суммарной длительности свипов. Если рассматривать встраиваемое приложение на базе IWR1443, то есть без необходимости обмена данными с ПК, это означает непрерывную скорость съема данных около 85 фреймов/с. Ограничивающим фактором в нашем примере является время обработки данных на ПК: оно больше в несколько раз и составляет приблизительно 300 мс.

Отладка SiRad Simple компании Silicon Radar

Ее фотография показана на рис. 6. Основу СВЧ-части составляет приемопередатчик TRX_120_001, на плате он виден как белый прямоугольник размером $8 \times 8 \text{ мм}$, его структурная схема показана на рис. 7. В комплекте предусмотрена пластиковая линза диаметром 32 мм, обеспечивающая ДН порядка 5° и усиление около 40–45 дБ. Управляющим элементом является микроконтроллер (МК) STM32F303RE. Для генерации СВЧ-сви́па используется микросхема ADF4159, которая управляется МК по шине SPI. Оцифровка каналов I/Q производится встроенными в МК 12-битными АЦП с частотой семплирования до 5 МГц. Управление модулем, а также передача данных от него осуществляется по COM-

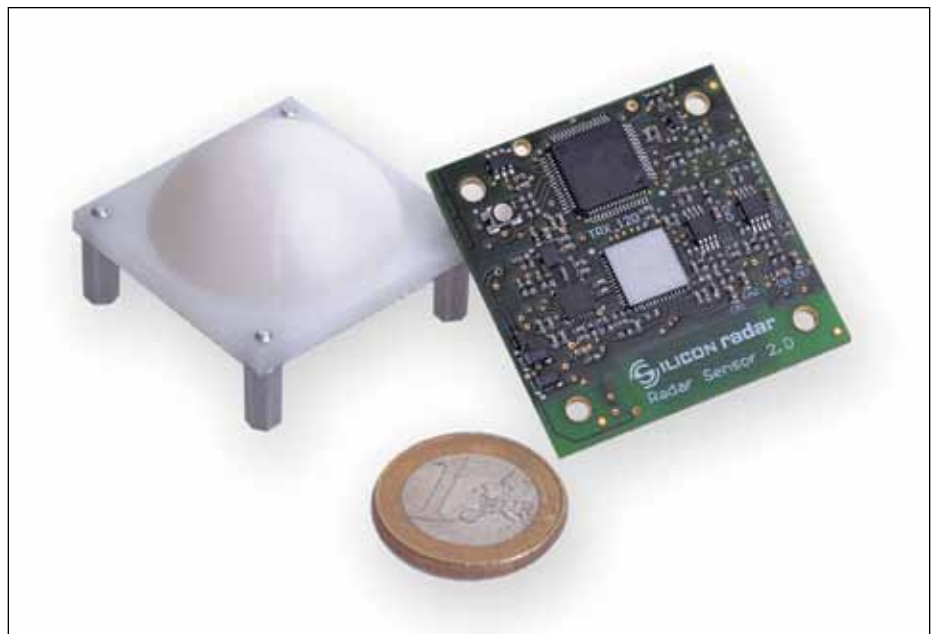


Рис. 6. Плата SiRad Simple и линза

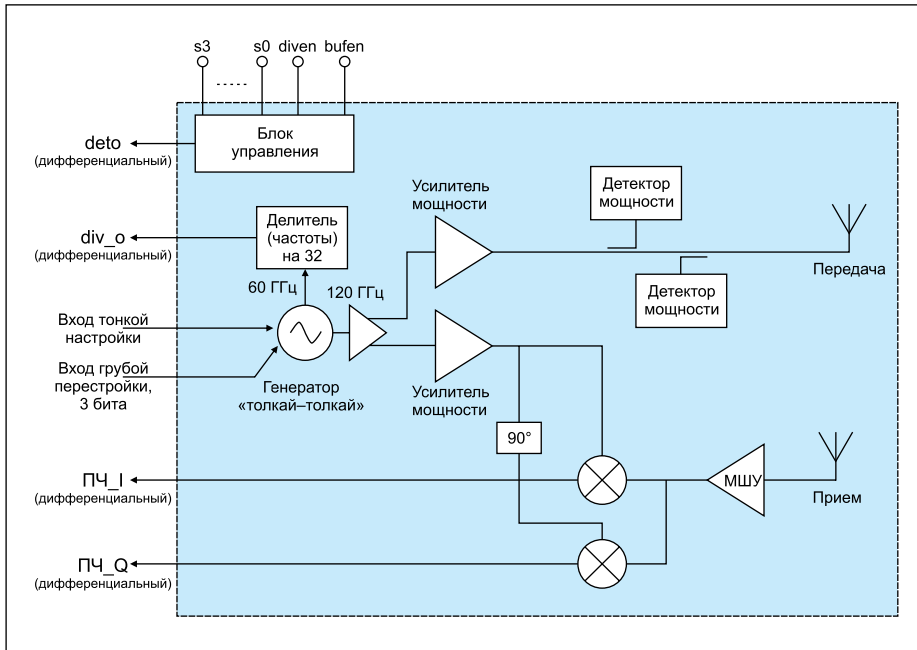


Рис. 7. Структурная схема TRX_120_001

Таблица 3. Основные параметры микросхем IWR1443 и TRX_120_001

Параметры	TRX_120_001	IWR1443
Диапазон частот, ГГц	119,1–125,9	76–81
Длина волны, мм	2,52–2,38	3,947–3,704
Полоса ЛЧМ, МГц	6800	4000
Разрешение по дальности, мм	20,8	40
Макс. скорость перестройки, МГц/мкс	25	100
Число TX	1	3 (2*)
Число RX	1	4
Выходная мощность, дБм	-3 ± 4	12×2 канала
Тип антенн	Встроенные	Внешние
Фазовый шум, дБн при 1 МГц	-91...-88	-94/-91**
IP1dB по входу, дБм	-20	-5
Коэффициент шума, дБ	9–10	15–16
Полоса ПЧ, МГц	200	15
Питание, В	1,2; 3,3	1,2; 1,3; 1,8; 3,3
АЦП/Процессор	нет/нет	37,5 Msp*** / Cortex @200 МГц
Корпус	QFN-56	Flip-Chip BGA-161
Размер корпуса, мм	8×8	10,4×10,4
Рабочий диапазон температур, °С	-40...+85	-40...+105

Примечания.

- * Лишь два могут работать одновременно.
- ** Шум тактовой частоты: -94 для 76–77 ГГц; -91 для 77–81 ГГц.
- *** Для комплексного сигнала 18,75 Msp.

порту на фиксированной скорости 230 400 bps. Такая низкая скорость заметно ограничивает число выборок в секунду. Для STM32F303RE, тем не менее, это далеко не предел — он позволяет получать скорость COM-порта до 9 Mbps, поддерживаются также скорости 921 600 bps, 1/2/3/6 Mbps. Дополнительно на плате установлена энергонезависимая память и модуль Wi-Fi ESP8266-12F, а также яркий светодиод, что актуально при работе на значительных расстояниях.

Производитель гарантирует для TRX_120_001 ширину свипа 6,8 ГГц, что соответствует разрешению по дальности 22,06 мм. Однако при включении отладки сканирует возможный диапазон перестройки и устанавливает его на максимум, это позволяет получить ширину свипа около 7,2 ГГц, с разрешением по дальности 20,8 мм.

Определение дальности до объекта с помощью SiRad Simple

Компания Silicon Radar предоставляет GUI, написанный под Java. Запустим его под Firefox 57.0.2 и определим расстояние до того же самого уголкового отражателя. Пластиковую

линзу не используем, так как ее нет у платы П1. На вкладке слева установим параметры сбора данных, которые сведены в таблицу 2. Время свипа в 1094 мкс лишь на несколько процентов больше, чем суммарная длительность свипов у IWR1443BOOST. Спектр сигнала показан на рис. 8 в центре экрана, белая линия отображает порог для селекции целей. В правом верхнем углу указана ширина ЛЧМ 7198 МГц и разрешение по дальности 2,08 см, число реализаций в секунду и приведен список целей. В строчке под номером 8 мы видим расстояние до уголкового отражателя, которое равно 3292 мм, с относительной мощностью сигнала -9 дБ, что на 178 мм меньше результата, полученного ранее в аналогичных условиях с платой П1. Такое расхождение невозможно объяснить погрешностью измерения и/или эксперимента.

Сравнительные характеристики

Для выяснения причины расхождения в данных была проведена оценка систематической погрешности измерения дальности на расстоянии 1 м при отражении сигнала от металлической плоскости. Погрешность составила примерно +5 мм для TRX_120_001 и +95 мм для IWR1443. Погрешность измерения 95 мм соответствует задержке в 633 пс. Этот результат подтвержден в эксперименте от производителя [10], где погрешность определена как +80 мм. По всей видимости, она обусловлена наличием в передающем тракте управляемых фазовращателей перед УМ (рис. 1), которые имеют базовую задержку.

Сравнительные характеристики микросхем сведены в таблицу 3. Для построения

Таблица 2. Параметры работы с TRX_120_001

Параметр	Значение
Начальная частота, ГГц	118,9
Скорость перестройки, МГц/мкс	6,58
Количество точек в свипе	512
Длительность свипа, мкс	1094
Число свипов во фрейме	1
Частота оцифровки, МГц	2,14
Полоса ЛЧМ, ГГц	7,198
Число фреймов/с	19,6
Число передающих антенн	1
Число приемных антенн	1

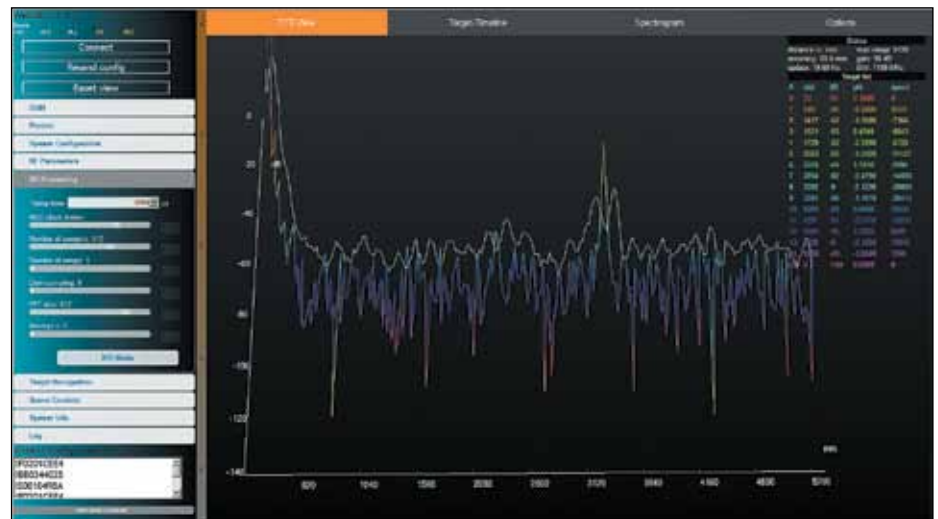


Рис. 8. Спектр сигнала SiRad Simple

автономного устройства обе микросхемы требуют дополнительной обвязки. Для IWR1443 это Flash-память с интерфейсом QSPI, четырехканальные преобразователи напряжения и внешние антенны. Для TRX_120_001 обвязки понадобится несколько больше. Помимо малошумящего стабилизатора питания (ADM7150, LT3042, TPS7A8xxx), нужен усилитель ПЧ, микросхема для формирования ЛЧМ (ADF4158/9, AD9952/3/4) и микроконтроллер со встроенным АЦП (STM32F303 с 5-MIPS АЦП, PIC32MZ с 28-MIPS АЦП) для оцифровки данных и их обработки. Тем не менее стоимость ее не слишком велика, и пользователь получает возможность конфигурировать параметры свипа и оцифровки ПЧ в более широких пределах.

К достоинствам IWR1443 отнесем: высокую скорость перестройки ЛЧМ; наличие многоканального приема и передачи, что позволяет строить 2D и 3D радарные изображения; высокую степень интеграции решения: приемопередатчик, формирователь свипа, АЦП и вычислитель в одном корпусе.

Преимуществами же TRX_120_001 являются: более высокая точность, обусловленная как полосой ЛЧМ, так и длиной волны; меньшая систематическая погрешность, которая может служить источником нестабильности; наличие встроенных антенн; возможность легко получить «кинжальный» узкий луч (2–5°) ДН с помощью дешевой пластиковой линзы; простота монтажа и производства.

Таким образом, радарные измерители расстояния миллиметрового диапазона становятся доступны для широкого круга пользователей.

К сферам их применения можно отнести дистанционный контроль: дорожного движения, прохождения таможни, вибраций, состояния пациентов в медицине, уровнемеры и системы технического зрения. ■

Литература

1. Горбатов К. Знакомство с компанией Silicon Radar // Компоненты и технологии. 2017. № 5.
2. Горбатов К. Silicon Radar: О дистанционном измерении дыхания и пульса // СВЧ-электроника. 2017. № 3.
3. Отладки компании Texas Instruments. www.ti.com/tool/IWR1443BOOST; www.ti.com/tool/IWR1642BOOST
4. Отладки компании Silicon Radar. www.siliconradar.com/evalkits_e.html
5. mmWave Device Firmware Package. www.ti.com/tool/MMWAVE-DFP
6. mmWave Software Development Kit. www.ti.com/tool/MMWAVE-SDK
7. mmWave Training. www.dev.ti.com/tirex/#/DevTool/IWR1443%20Industrial%20EVM/?link=Software%2FmmWave%20Training
8. mmWave Demo Visualizer. www.dev.ti.com/mmWaveDemoVisualizer
9. Галерея приложений TI. www.dev.ti.com/gallery
10. Детектирование стен из различных материалов. www.dev.ti.com/tirex/content/mmwave_training_1_5_5/experiments/Measuring+Object+Height+with+mmWave+Radar.html