Silicon Radar:
новые, сверхширокополосные

Константин ГОРБАТОВ
kvg@efo.ru

Компания Silicon Radar [1] основана в 2006 году во Франкфурте-на-Одере (Германия). Она специализируется на разработке и производстве широкополосных радарных модулей по технологии SiGe (фаб. IHP) как для ISM-диапазонов 24,05–24,25; 61–61,5; 122–123 и 244–246 ГГц, так и за их пределами.
Радарные модули ISM-диапазонов 24–122 ГГц с широкой перестройкой компания Silicon Radar выпускает серийно уже несколько лет, являясь лидером на рынке в этом сегменте. Ранее данные продукты рассматривались в [2]. Компания осуществляет также заказные и инновационные разработки. В статье речь пойдет о новых микросхемах Silicon Radar с широкой перестройкой для различных диапазонов до 300 ГГц и о перспективах их применения.

О микросхеме T2R4_024_020 для диапазона 24 ГГц

Диапазон ISM 24,05–24,25 ГГц уже хорошо освоен различными производителями. Например, ряд микросхем серии BGT24 выпускается компанией Infineon. Компания Analog Devices изготавливает микросхемы серии ADF59, которые отличаются хорошими фазовыми шумами. Радарные модули с уже готовыми антеннами производятся компанией RFbeam [3].

Микросхемы компании Silicon Radar отличаются от своих конкурентов широкой, до 3 ГГц, перестройкой. Так, одноканальные радарные модули TRX_024_007 [4] серийно выпускаются уже несколько лет и находят применение в автомобильных радарах и уровнемерах. Широкая полоса перестройки позволяет, согласно формуле (1), при ЛЧМ-модуляции получить гораздо лучшее (3 ГГц/0,2 ГГц = 15), чем у конкурентов, разрешение по дальности.

$$R = c/2\times BW, \qquad (1)$$

где BW — полоса модуляции сигнала ЛЧМ, Гц; R — расстояние до объекта, м; c — скорость света, м/с.

Для многих применений, кроме хорошего разрешения по дальности, весьма желательно иметь и хорошее разрешение по углу, что достигается с помощью многоканального приема. Этим требованиям удовлетворяет микросхема T2R4_024_020, ее структурная схема показана на рис. 1. Она содержит ГУН для диапазона частот 22,7–26,3 ГГц, делитель частоты на 8 для ФАПЧ, два УМ, четыре независимых приемника с балансными смесителями, SPI-интерфейс. Полоса перестройки ЛЧМ-сигнала у нее достигает 3,6 ГГц, что позволяет получить разрешающую способность по расстоянию 4,17 см (1). Кривые перестройки по частоте для этой микросхемы показаны на рис. 2.

В данный момент T2R4_024_020 изготавливается в мелкосерийном производстве, по процессу MPW, поэтому ее цена пока относительно высока. Для нее компания Silicon Radar предлагает плату Radarboard T2R4_024_020, которая содержит микросхему, стабилизаторы питания, усилители сигналов I/Q и разъемы, на которые выведены все основные сигналы. Верхний слой платы выполнен из материала компании Rogers RO4350B.

На основе данной микросхемы также разработан отладочный комплект EvalKit SiRad MIMO 24 ГГц [5]. Благодаря многоканальному приему он обеспечивает пространственное разрешение по углу до 0,75° и позволяет реализовывать сложные алгоритмы обработки данных с помощью встроенного скоростного DSP фирмы Xilinx. Фотография комплекта со стороны антенн показана на рис. 3.

Широкая полоса перестройки для автомобильных радаров ближнего действия разрешена нормативными актами. Так, 17 января 2005 года комиссией Евросоюза был выделен

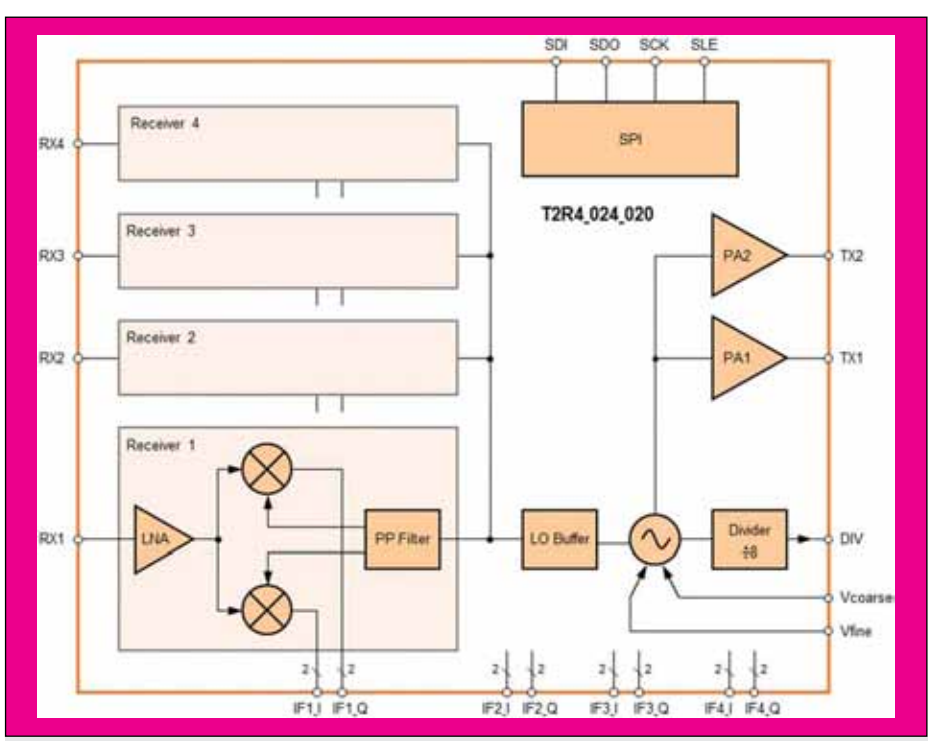

Рис. 1. Структурная схема T2R4_024_020

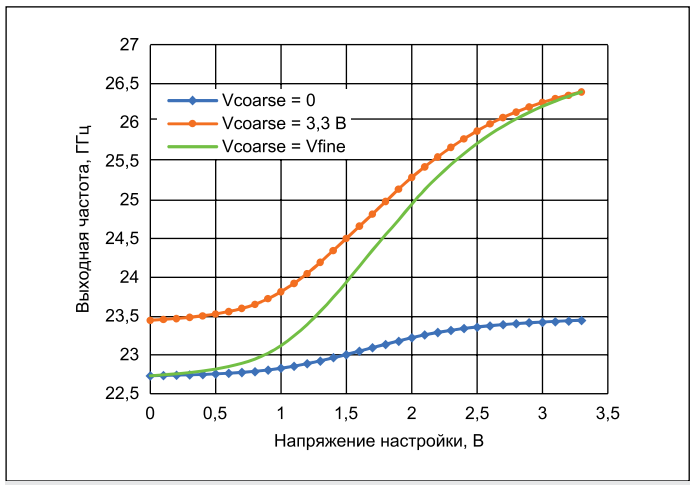

Рис. 2. Перестройка по частоте для T2R4_024_020

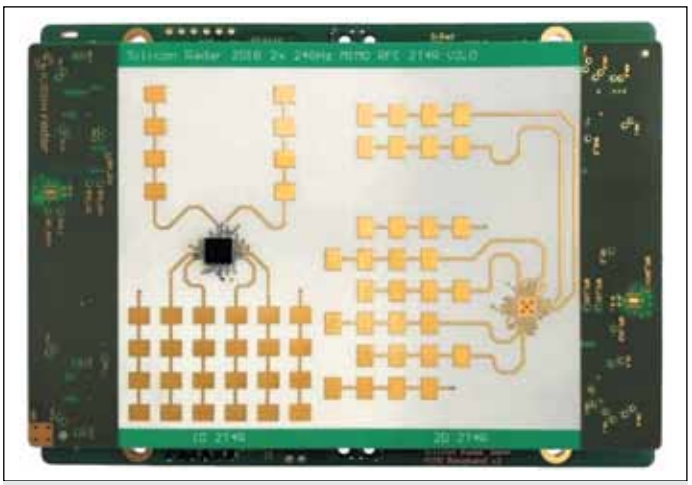

Рис. 3. Плата 24 ГГц MIMO Radar EvalKit

диапазон частот 21,56–26,65 ГГц. В России диапазон 22–26,65 ГГц выделен по решению ГКРЧ при Минкомсвязи России от 2.10.2012 № 12-15-05-8. Возможно, этот диапазон скоро будет предназначен и для стационарных радаров, которые используются для контроля дорожного движения.

О микросхемах для ISM-диапазона 60 ГГц

Упомянем сначала альтернативные решения. Одним из первых был Infineon с радарным модулем BGT60 для телекоммуникационного рынка, который сейчас уже, впрочем, снят с производства. Компания Analog Devices, как и для диапазона 24 ГГц, отдельно выпускает передатчик и приемник. Эти микросхемы предназначены в основном для передачи сигналов с помощью FSK, OOK, MSK и до 256 QAM-типов модуляции и отличаются низкими фазовыми шумами. Структурная схема передатчика HMC6300 представлена на рис. 4. Он содержит ГУН на 20 ГГц; умножитель на 3, обеспечивающий на выходе 57–64 ГГц; модулятор с полосой до 1,8 ГГц; УМ и SPI-интерфейс. Приемник HMC6301 содержит демодулятор и предназначен для совместного использования с передатчиком HMC6300.

Микросхема IWR6843 компании Texas Instruments создана для радарных приложений для диапазона частот 60–64 ГГц, имеет три передатчика и четыре приемника. Полоса непрерывной перестройки составляет 4 ГГц. Ее структурная схема показана на рис. 5. Она представляет интегрированное решение: радарный модуль + фазовращатели + АЦП + микроконтроллер Cortex R4F 200 МГц. К ее достоинствам относятся также высокая скорость перестройки частоты, до 250 МГц/мкс; скорость оцифровки I/Q-выходов до 25 Мвыборок/с и их низкий дисбаланс по амплитуде и фазе.

Для этого диапазона компания Silicon Radar выпускает одноканальный радарный модуль TRX_060_011; двухканальный TR2_060_010 и многоканальный МИМО T4R4_060_029.

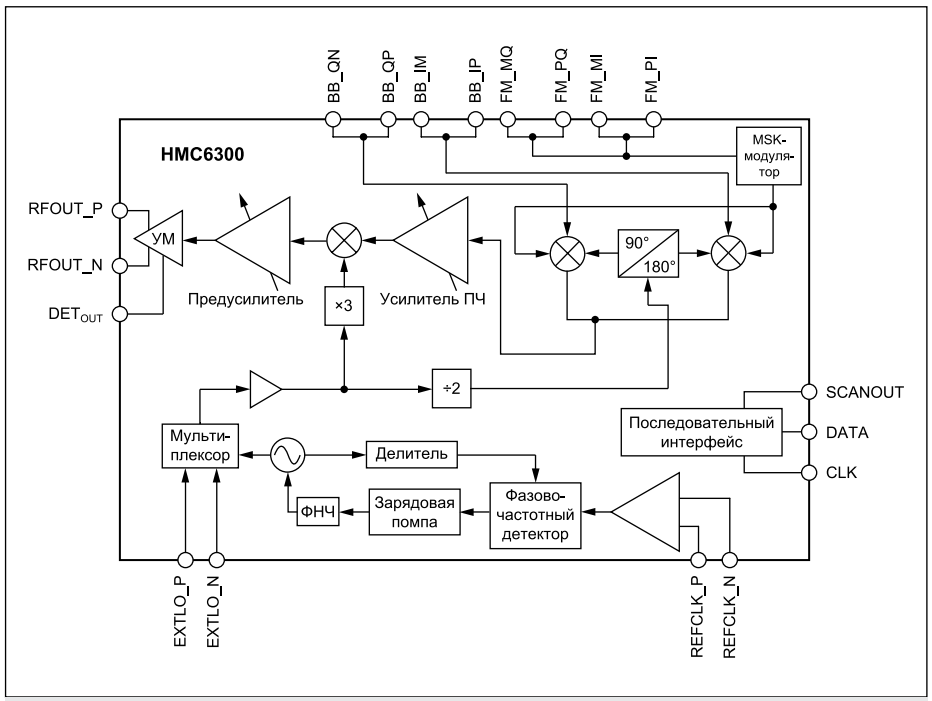

Рис. 4. Структурная схема HMC6300

TRX_060_011 выпускается в виде кристалла размером 1,42×0,72 мм, ее структурная схема показана на рис. 6. Она содержит ГУН на 30 ГГц; делитель частоты на 32; умножитель на 2, обеспечивающий перекрытие по частоте 58,31–63,91 ГГц; УМ; МШУ; квадратурный смеситель; направленный ответвитель для развязки приемного и передающего каналов. Полоса перестройки ЛЧМ-сигнала здесь составляет до 5,6 ГГц, что позволяет получить разрешающую способность по расстоянию до 2,68 см (1). На основе данной микросхемы предлагается плата Radarboard TRX_060_011, которая предназначена для использования в качестве сменного модуля в составе универсального комплекта разработчика Evalkit SiRad Easy. Плата содержит чип, патч-антенны и разъем для подключения к основной плате. Плата многослойная, верхний слой выполнен из RO3003.

Микросхема TR2_060_010 — это аналогичный радарный модуль, только с двумя каналами приема и раздельными антеннами. Он выпускается в виде кристалла размером 1,65×1,05 мм, его структурная схема показана на рис. 7. Радарный модуль содержит ГУН на 30 ГГц; делитель частоты на 32; умножитель на 2, обеспечивающий перекрытие по частоте 58,31–63,91 ГГц; УМ; два МШУ; два квадратурных смесителя. Полоса перестройки ЛЧМ сигнала тут также до 5,6 ГГц, что соответствует разрешающей способности по расстоянию до 2,68 см (1). На основе данной микросхемы предлагается плата Radarboard TR2_060_010, которая предназначена для использования в качестве сменного модуля в составе универсального комплекта разработчика Evalkit SiRad Easy. Плата содержит чип, патч-антенны и разъем для подклю-

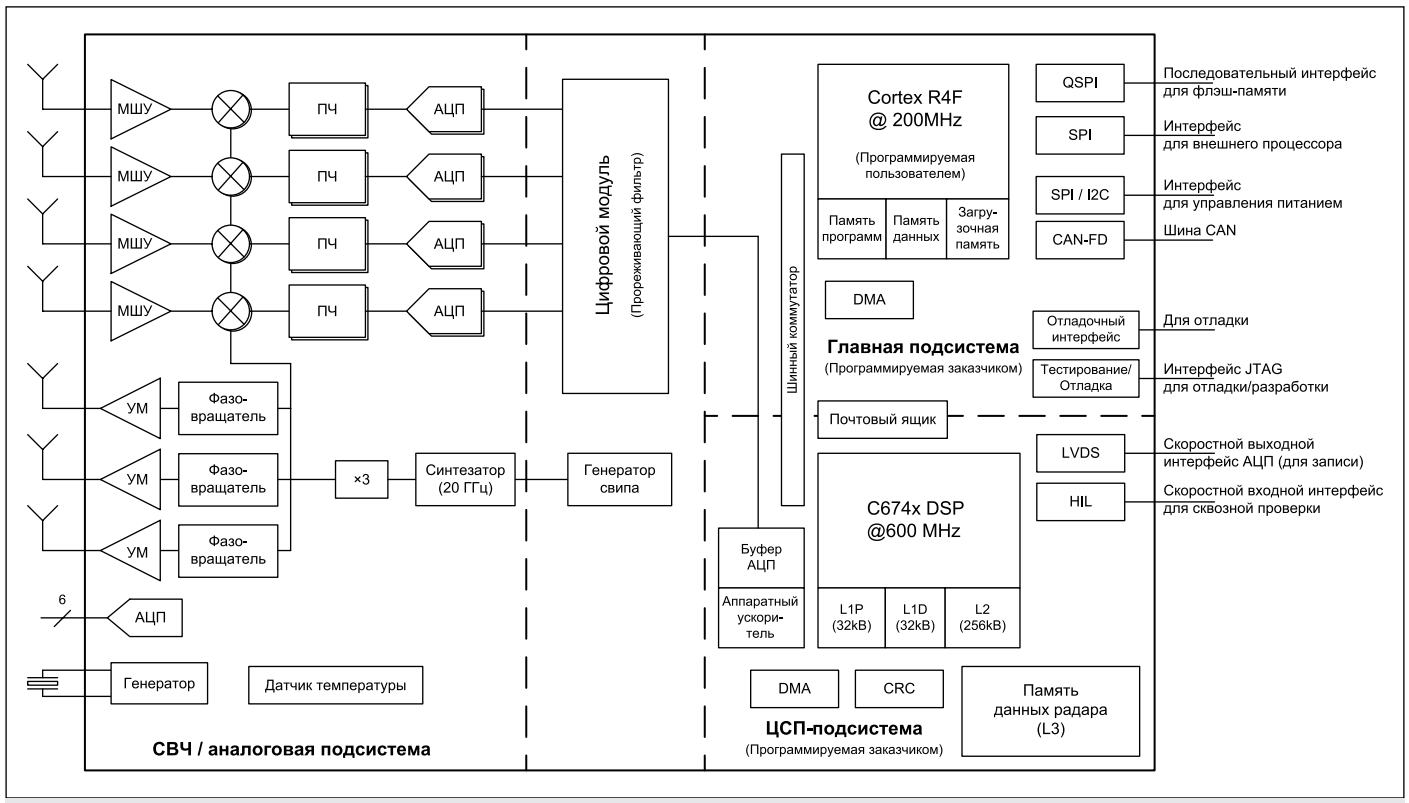

Рис. 5. Структурная схема IWR6843

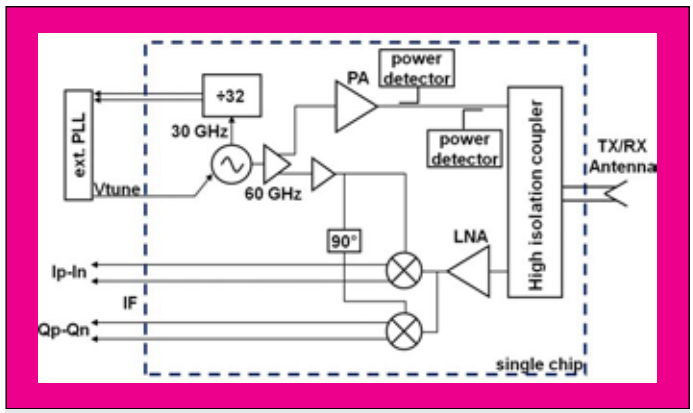

Рис. 6. Структурная схема TRX_060_011

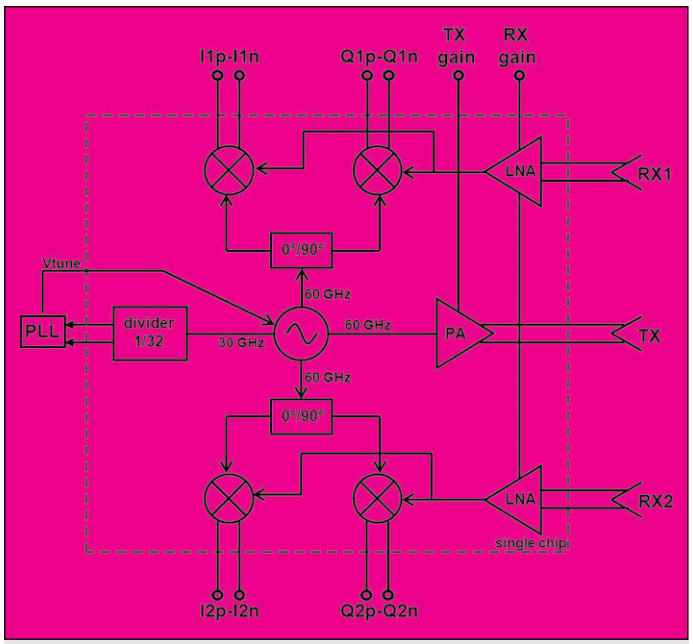

Рис. 7. Структурная схема TR2_060_010

чения к основной плате. Плата многослойная, верхний слой выполнен из RO3003.

Микросхема T4R4_060_029 производится в виде кристалла размером 2,26×2,49 мм, ее структурная схема показана на рис. 8. Она содержит ГУН на 20 ГГц; делитель частоты на 4; умножитель на 3, обеспечивающий перекрытие по частоте 55,5–64,6 ГГц; переключатель источника частоты для умножителя; четыре независимых передатчика и четыре приемника. Полоса перестройки ЛЧМ-сигнала здесь 9,1 ГГц, что позволяет получить разрешающую способность по расстоянию уже 1,65 см (1). Данную микросхему можно легко каскадировать, так как сигнал на умножитель может подаваться как с внутреннего ГУН, так и с внешнего входа. Выход гетеродина тоже имеется. Это особенно важно для построения многоканальной радарной системы с высоким разрешением по азимуту. Компания Silicon Radar предлагает также плату Radarboard T4R4_060_029, где установлена микросхема, стабилизатор питания и разъемы, на которые выведены все основные сигналы. Верхний слой платы выполнен из RO3003.

Новый радарный модуль для ISM-диапазона 122 ГГц

Для данного частотного диапазона ближайшим конкурентом компании Silicon Radar можно считать компанию Texas Instruments. Сравнительный анализ радарного модуля IWR1443, который работает в диапазонах частот 76–77 ГГц, 77–81 ГГц, и радарного модуля TRX_120_001 был проведен ранее в [6].

Одноканальные микросхемы TRX_120_001 [7], TRA_120_002 [8] уже несколько лет выпускаются серийно, что говорит об отрабо-

танной технологии и высоком уровне качества. Цена микросхем в серийном производстве также существенно ниже, чем экспериментальных образцов. Они изготавливаются в корпусах QFN и имеют встроенные антенны, что позволяет существенно сэкономить на разработке антенн и постановке их в производство. Желаемая диаграмма направленности с углом раскрыва до 2–4° может быть получена с помощью недорогой пластиковой линзы. Микросхемы обеспечивают генерацию ЛЧМ-сигналов с типовой перестройкой 6,5 ГГц примерно за 1 мс, что соответствует разрешению по дальности 2,31 см (1). Некоторые экземпляры микросхем обеспечивают перестройку до 7,5 ГГц.

Новинка компании, микросхема TRA_120_031 [9], также является одноканальной, выпускается в корпусе QFN-32 и имеет встроенные антенны. Ее структурная схема и типовое включение показано на рис. 9. Микросхема состоит из ГУН 65 ГГц; делителя частоты на 32; умножителя на 2, который обеспечивает на выходе частоту 117,4–142,3 ГГц; УМ; двух встроенных антенн на прием и передачу; МШУ и квадратурного смесителя с дифференциальными выходами I/Q. Микросхема позволяет получить ЛЧМ-сигнал с перестройкой до 24,9 ГГц, что соответствует разрешению по дальности 0,6 см (1).

При такой большой перестройке для управления ГУН используется два входа — по напряжению Vt и токовый Icont, которые работают в противофазе. Схема усилителя для получения этих управляющих сигналов приведена на рис. 10. Компания Silicon Radar предлагает также плату Radarboard TRA_120_031, которая предназначена для использования в качестве сменного модуля для универсального комплекта разработчика Evalkit SiRad Easy.

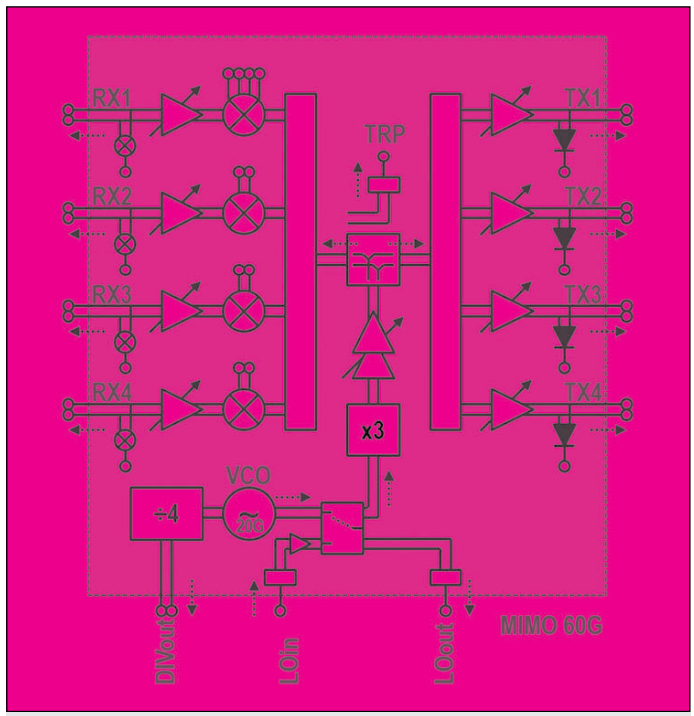

Рис. 8. Структурная схема T4R4_060_029

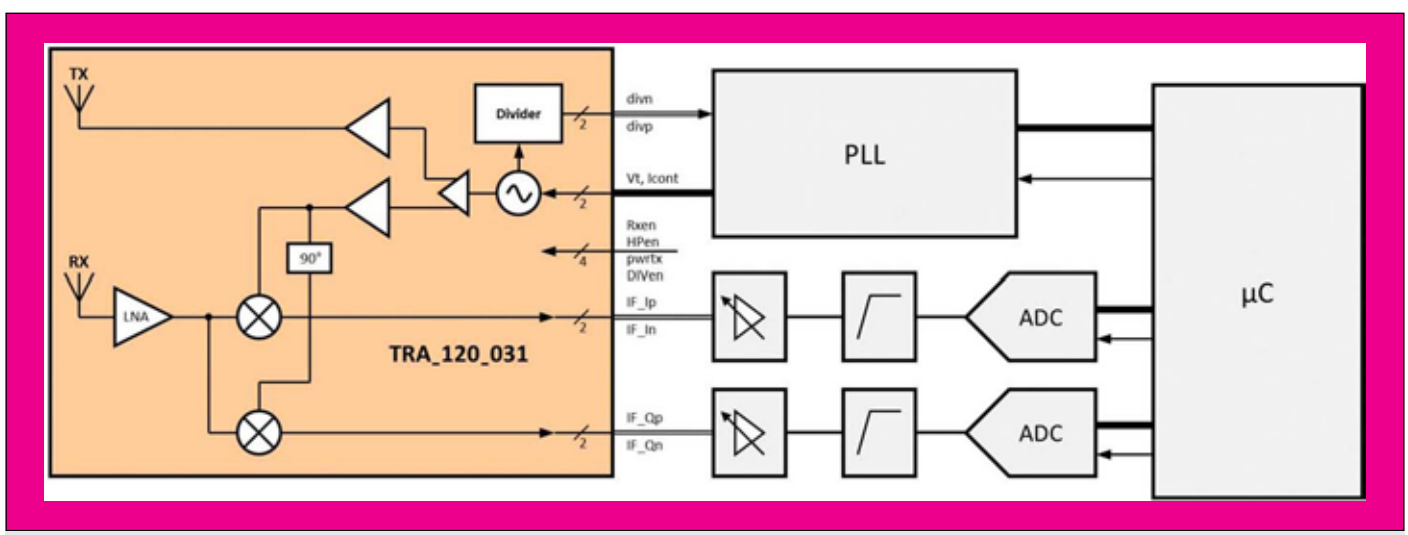

Рис. 9. Схема включения TRA_120_031

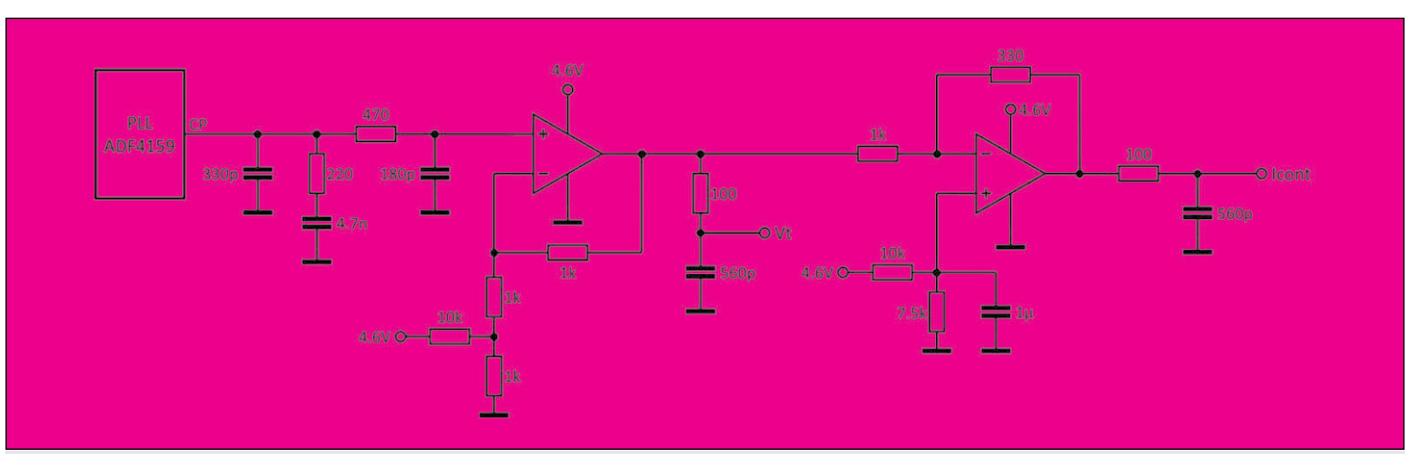

Рис. 10. Усилитель для управления перестройкой TRA_120_031

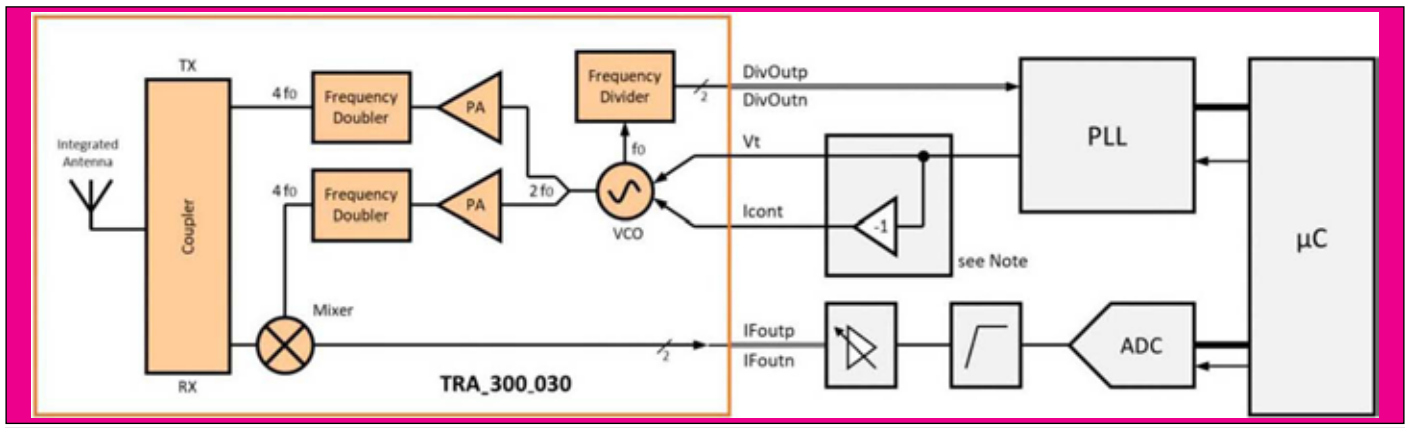

Рис. 11. Структурная схема микросхемы TRA_300_030 и ее типовое включение

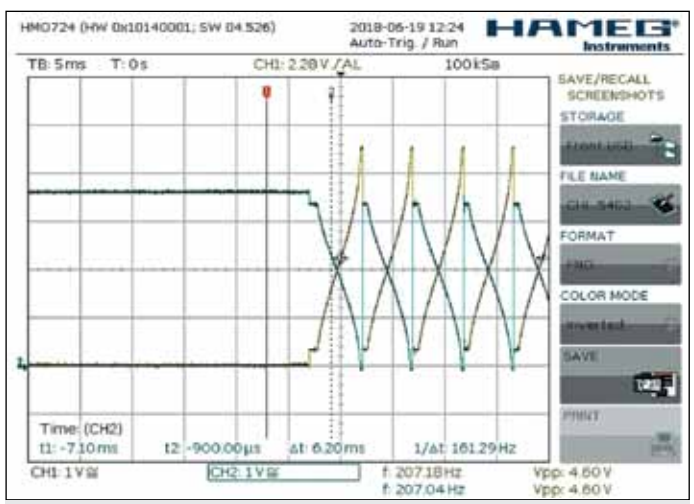

Рис. 12. Эпюры сигналов Vt, Icont при перестройке TRA_300_030

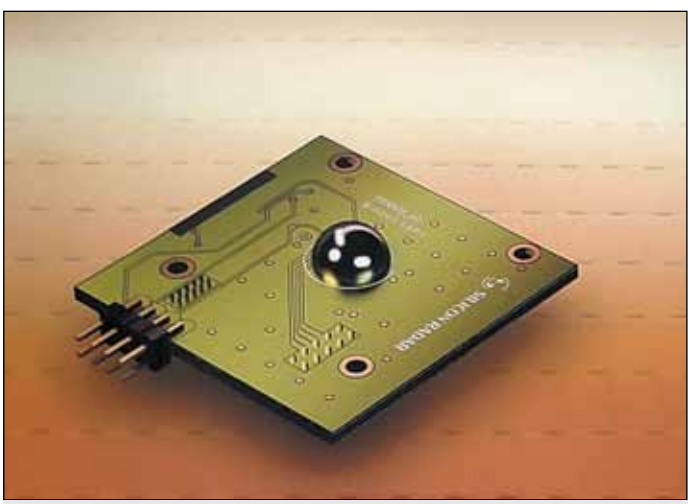

Рис. 13. Плата Radarboard TRA_300_030

Инновационная микросхема для диапазона 300 ГГц

Это новейшая разработка компании Silicon Radar — одноканальная микросхема TRA_300_030, которая выпускается в форме кристалла, а также в корпусе QFN-28 размером 5×5 мм как в сборе с пластиковой линзой, так и без оной. Структурная схема микросхемы и ее типовое включение показано на рис. 11. Микросхема включает широкополосный ГУН 75 ГГц; делитель частоты для ФАПЧ; умножитель частоты на 4 для передатчика, который обеспечивает на выходе частоту 287–328,5 ГГц; умножитель частоты для приемника (смесителя), встроенную антенну; направленный ответвитель, обеспечивающий развязку между приемным и передающим каналами. Микросхема позволяет получить ЛЧМ-сигнал с рекордной перестройкой до 41,5 ГГц, что соответствует разрешению по дальности до 0,36 см (1). Для управления ГУН здесь тоже предусмотрено два входа — по напряжению и токовый. Эпюры сигналов на них при полной перестройке по частоте показаны на рис. 12. Примечательно, что весь частотный диапазон 41,5 ГГц перестраивается за время, составляющее около 5 мс.

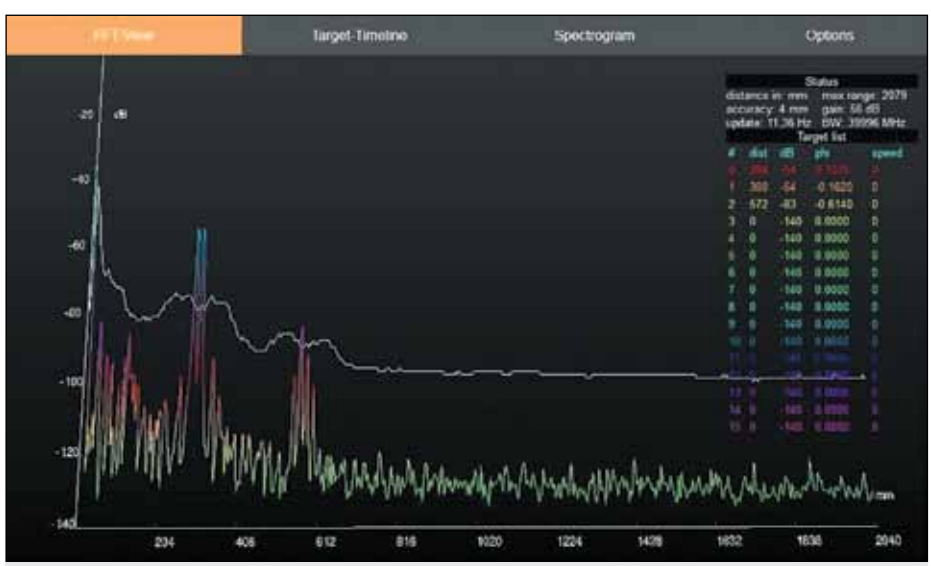

Рис. 14. Спектр сигнала ПЧ при отражении от двух объектов при использовании TRA_300_030 в составе комплекта разработчика Evalkit SiRad Easy

Компания Silicon Radar также предлагает плату Radarboard TRA_300_030 [10], представленную на рис. 13. Она предназначена для использования в качестве сменного модуля в составе универсального комплекта разработчика Evalkit SiRad Easy. Спектр сигнала ПЧ, полученный с помощью данного комплекта и упомянутой платы, показан на рис. 14. На нем видно достигнутое превос-

ходное разрешение — два отклика от объектов на расстоянии 284 и 300 мм.

Заключение

Характеристики радарных модулей компании Silicon Radar со сверхширокополосной перестройкой представлены в таблице. При использовании модулей в ЛЧМ-радарах таким образом удается достичь высокой точности определения расстояния по отсчетам БПФ — 4,17/2,14/1,65/0,6/0,36 см. Использование фазовой информации позволяет получить субмиллиметровую точность. Компанией Silicon Radar создан специальный демонстрационный стенд на основе Evalkit SiRad Simple. Он помогает верифицировать данные, полученные с помощью радара 122 ГГц по калиброванному микронному смещению стальной пластины. Достигнутая с помощью радара точность позволяет также идентифицировать сердцебиение и дыхание на расстоянии, как было показано ранее в [11].

При треугольном ЛЧМ-сигнале можно измерить сразу скорость и расстояние, а также направление движения объекта с высокой точностью всего лишь за несколько миллисекунд. При необходимости получить узкий луч с ДН до 2–4° можно использовать пластиковые линзы с дальностью работы до 40 м.

Микросхемы МИМО с многоканальным приемом позволяют также получить хорошее разрешение по азимуту — до 0,75°. Радары на миллиметровых волнах компактны и практически не имеют мертвой зоны. Быстрая перестройка по частоте предусматривает выполнение нескольких сотен измерений в секунду, что важно при наблюдении за быстро перемещающимися объектами.

Для сокращения затрат и времени на разработку компания Silicon Radar выпускает демонстрационные платы и комплекты для всех микросхем. Платы и комплекты сокращают затраты на изготовление прототипов, позволяют быстро верифицировать параметры микросхем и оценить реализуемость конкретного проекта заказчика. Наиболее универсальным решением является комплект разработчика Evalkit SiRad Easy, который благодаря сменным модулям позволяет начать работу почти со всеми выпускаемыми компанией микросхемами, в пределах 24–300 ГГц.

Микросхемы компании Silicon Radar находят применение в робототехнике, для обнаружения малоразмерных препятствий; в прецизионном контроле качества поверхностей и материалов; в медицине [12] для бесконтактной диагностики и для измерения сердцебиения и дыхания; на производстве; в автомобильном и железнодорожном транспорте, для локализации объектов и измерения их скорости. На рис. 15 представлены разработки ведущих мировых производителей, показанные на стенде компании Silicon Radar во время выставки EuMW-2019 в Париже: уровнемеры 24, 122 ГГц компании Anlysun (Китай); велосипедные радары Garmin (США); радар для сельского хозяйства Baumer Electric AG (Швейцария); радар для определения качества дорожного покрытия Streetscan (США); радар для отслеживания полета мячика для гольфа. Несомненно, микросхемы компании Silicon Radar найдут применение и в России.

Рис. 15. Приборы на основе микросхем компании Silicon Radar

Таблица. Характеристики радарных модулей

Название	Число каналов на передачу/прием	Антенны	Диапазон частот, ГГц	Перестройка, ГГц	Разрешение по дальности, см	Корпус	Размер, мм
TRX_024_007	1/1	Внешние	22,8–26,4	4,17	3,6	QFN-20	3×3
T2R4_024_020	2/4	Внешние	22,7–26,3	4,17	3,6	QFN-32	5×5
TRX_060_011	1/1	Внешние	58,31–63,91	5,68	2,68	Кристалл	1,42×0,72
TR2_060_010	1/2	Внешние	58,31–63,91	5,68	2,68	Кристалл	1,65×1,05
T4R4_060_029	4/4	Внешние	55,5–64,6	9,1	1,65	Кристалл	2,26×2,49
TRX_120_001	1/1	Встроенные	119,3–125,8	6,5	2,31	QFN-56	8×8
TRA_120_002	1/1	Встроенные	119,3–125,8	6,5	2,31	QFN-32	5×5
TRA_120_031	1/1	Встроенные	117,4–142,3	24,9	0,6	QFN-32	5×5
TRA_300_030	1/1	Встроенные	287–328,5	41,5	0,36	QFN-28	5×5

Литература

1. Компания Silicon Radar. www.siliconradar.com
2. Горбатов К. Знакомство с компанией Silicon Radar // Компоненты и технологии. 2017. № 5.
3. www.efo.ru/storage/docs/23_190.pdf
4. Горбатов К. Радарные модули фирмы RFbeam диапазона ISM 24,05–24,25 ГГц // Компоненты и технологии. 2015. № 4.
5. Спецификация на TRX_024_007. www.efo.ru/storage/pdf/Silicon%20Radars/Datasheet_TRX_024_007_V1.4.pdf
6. EvalKit SiRad MIMO 24 GHz. www.siliconradar.com/evalkits/#sirad-mimo
7. Горбатов К. О точных измерителях дальности от компаний Texas Instruments и Silicon Radar // Компоненты и технологии. 2018. № 2.
8. Спецификация на TRX_120_001. www.efo.ru/storage/pdf/Silicon%20Radars/Datasheet_TRX_120_001_V1.3.pdf
9. Спецификация на TRA_120_002. www.efo.ru/storage/pdf/Silicon%20Radars/Datasheet_TRA_120_002_V0.7.pdf
10. Спецификация на TRA_120_031. www.efo.ru/storage/pdf/Silicon%20Radars/Datasheet_TRA_120_031_V0.1.pdf
SiRad Easy 300 GHz Front End board. www.siliconradar.com/wiki/SiRad_Easy_300_GHz_Front_End_Board
11. Горбатов К. Silicon Radar: о дистанционном измерении дыхания и пульса // СВЧ-электроника. 2017. № 3.
12. Gorbatov K. V., Mamaeva T. U. Radar Sensor Evalkit SiRad Simple 120 of Silicon Radar Company and its Usage in Bioengineering, materials of Russian-German Conference on Biomedical Engineering "RGC-2019", 3–6 July 2019, St. Petersburg.