

Знакомство с компанией Silicon Radar

Константин ГОРБАТОВ
kvg@efo.ru

Компания Silicon Radar основана в 2006 году во Франкфурте-на-Одере (Германия). Она специализируется на производстве радарных модулей, приемопередатчиков и их узлов (ГУН, МШУ, смесители для преобразования частоты вниз/вверх) как для нелицензируемых ISM-диапазонов 24–24,25; 61–61,5; 122–123; 244–246 ГГц, так и за их пределами.

Компания применяет SiGe BiCMOS-процессы 0,13 и 0,25 мк фаба IHP, участвующего в европейском проекте DOTFIVE. Его цель — разработка микросхем до 0,5 ТГц.

Области применения продукции обширны и включают системы медицинской диагностики; спектроскопию материалов и газов; распознавание жестов и присутствия человека для НМІ; промышленные датчики для измерения расстояния, скорости и вибрации; обнаружение препятствий, системы технического зрения и взаимодействия для робототехники, вертолетов, МПЛА и автомобильной техники.

История создания и краткая справка

Созданная в 2006 году, компания Silicon Radar [1] обладает высоким научным потенциалом. При общем штате менее 30 человек в ней трудятся шесть докторов наук. Список их научных работ приведен на сайте [2].

Один из них, технический директор компании доктор Вольфганг Винклер — ученый с более чем 20-летним стажем, занимается

проектированием СВЧ-микросхем на основе SiGe [3–5]. В IEEE опубликовано свыше 60 его работ в соавторстве с другими учеными. С 1998 по 2007 год он был дизайнером микросхем в фабе IHP. Его основные проекты посвящены построению узлов приемопередатчиков на 24, 60, 122 и 240 ГГц, а также MEMS-переключателям. Доктор Войцех Дебски в компании с 2007 года. Он специализируется на разработке узлов приемопередатчиков на 24, 77 и выше 100 ГГц по технологии SiGe, у него около 20 публикаций на IEEE.

Сочетание высокого научного потенциала и инвестиций принесло свои плоды. Компания стала прибыльной уже спустя два года после основания, а в 2015-м заработала 1,1 млн евро! В 2009 году была внедрена система качества ISO:9001.

С 2010 года фирма принимает участие в европейских проектах с совместным финансированием:

- ELIRAD (Everyday Life RADar Sensors For Transportation) — радарный датчик для транспорта на «каждый день»; миниатюрный радарный датчик на 120 ГГц;
- NANOTEC — материалы с наноструктурой для технологий RF MEMS RFIC/MMIC для высокоадаптивных систем; 10–24-ГГц ФАР для аэрокосмической техники; перестраиваемый МШУ/УМ на 71–86 ГГц для передачи данных «точка-точка» E-диапазона; высокочувствительный 94-ГГц приемник для построения изображений; активный радарный 140-ГГц модуль;
- SUCCESS (Silicon based Ultra Compact Cost-Efficient System design for mmw-Sensors) — компактные недорогие сенсоры на кремниевой технологии;
- DIFFERENT (Digital beam Forming For low-cost multi-static spaceborne Synthetic aperture radar) — бюджетный радар с цифровой синтетической апертурой формирования луча;



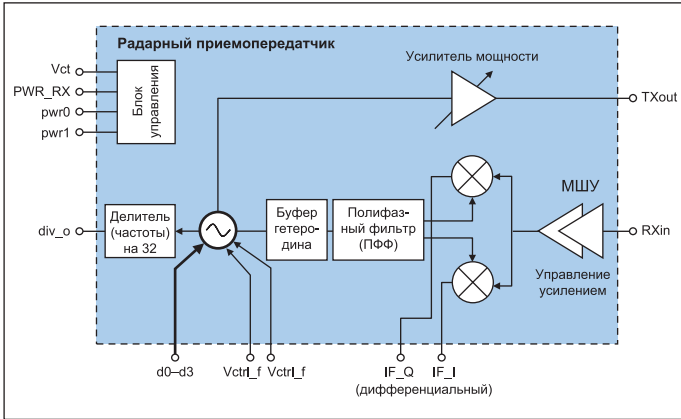


Рис. 1. Структурная схема TRX_024_06

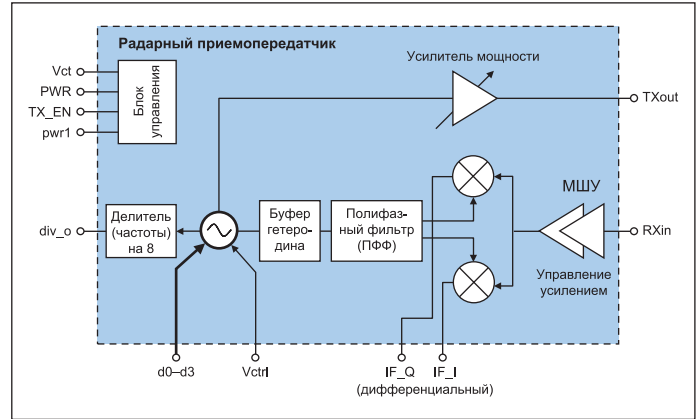


Рис. 2. Структурная схема TRX_024_07

- E3Network — дизайн приемопередатчика E-диапазона (60–90 ГГц) для транзитной инфраструктуры телекоммуникационных сетей будущего;
- SATRENE RF2Thz — широкополосная система на 240 ГГц с отличным пространственным разрешением, 77/120-ГГц автомобильные радары, беспроводная сеть 60 ГГц, 400-Гбит система для волоконной оптики;
- FAST IMAGING — сверхширокополосный радар с архитектурой OFDM-MIMO, 4–40 ГГц.

Благодаря этим проектам Silicon Radar имеет связи с институтами Фраунгофера, Хинца Никсдорфа и Лейбница, университетом в Ульме, компаниями Airbus, Sivers-IMA и другими научными и производственными организациями как в Германии, так и за ее пределами. Компания принимает активное участие в региональных и международных выставках: Sensor+Test, Industrial Automotion, Electronica, EuMW, ESA Industry Space Days.

В 2013 году Silicon Radar получила инвестиций на 800 тыс. евро и запустила свои 24-ГГц приемопередатчики в массовое производство. Ключевые клиенты — Garmin, всемирно известный производитель навигационного оборудования, Hella KGaA Hueck & Co., ведущий мировой производитель в области светотехники и электроники для автомобильной промышленности. В начале этого года компания запустила в серийное производство приемопередатчик на 122 ГГц — TRX_120_001. Второй чип, TRX_120_002, пока доступен по процессу MPW (Multi Project Wafer), к его серийному освоению планируется приступить летом. Далее рассмотрим стандартные продукты компании.

Микросхемы для приемопередатчиков ISM-диапазона на 24 ГГц

Silicon Radar предлагает линейку микросхем на 24 ГГц, их краткие характеристики приведены в таблице 1. Документация

Таблица 1. Микросхемы для диапазона ISM 24 ГГц компании Silicon Radar

Микросхема	Название	Частота, ГГц		Питание		Выходная мощность, дБм	Усиление, дБ	Поставляется в виде кристалла	Корпус	Размер корпуса, мм
		min	max	Напряжение, В	Ток, мА					
LNA_024_04	МШУ	21,5	28,7	3,3	5,7	5	8/15	Да	QFN-16	3×3
RX_024_04	Приемник	23	29	2,5	13,5	—	16/17	Да	QFN-16	3×3
VCO_024_04	ГУН	23,5	26	3/2,5	78/8	4×2	—	Да	—	—
TRXS2_024_05*	Приемопередатчик	23,2	25,9	3,3	121	1	11/18	Да	QFN-28	4×4
TRX_024_06	Приемопередатчик	23,2	26,3	3,3	89	4	11/18	Да	QFN-20	3×3
TRX_024_07	Приемопередатчик	23,2	26,3	3,3	89	4	11/18	Да	QFN-20	3×3

Примечание. * Предварительные данные. Имеет два приемных канала.

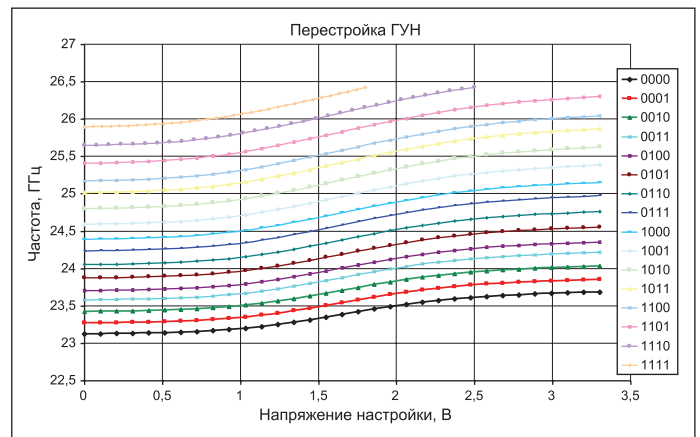


Рис. 3. Диапазоны частот ГУН у TRX_024_06

на TRX_024_006 доступна на сайте компании [6]. Следует отметить, что компания недавно изменила нумерацию своих микросхем, пока не переработав документацию. В ряде случаев это сделано добавлением 0 (но не только). Так, TRX_024_06 был переименован в TRX_024_006. В настоящей статье приведены названия микросхем в последней нотации. Документация на TRX_024_007 доступна по запросу. На рис. 1, 2 приведены структурные схемы приемопередатчиков. В основном TRX_024_007 и TRX_024_006 различаются

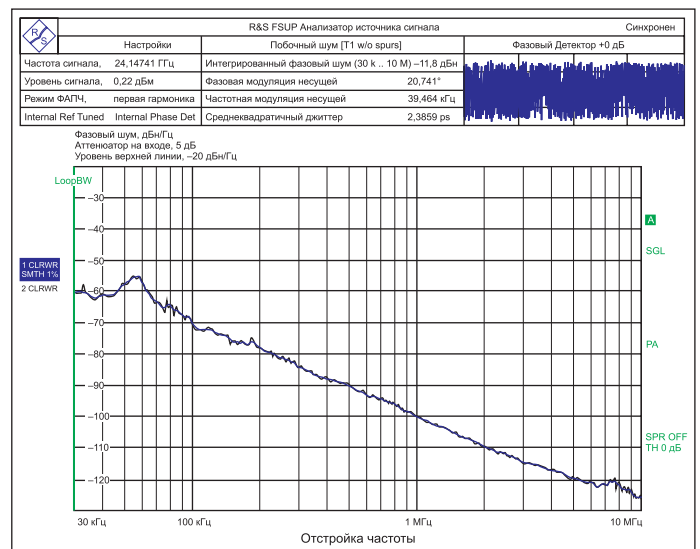


Рис. 4. Фазовые шумы для TRX_024_06

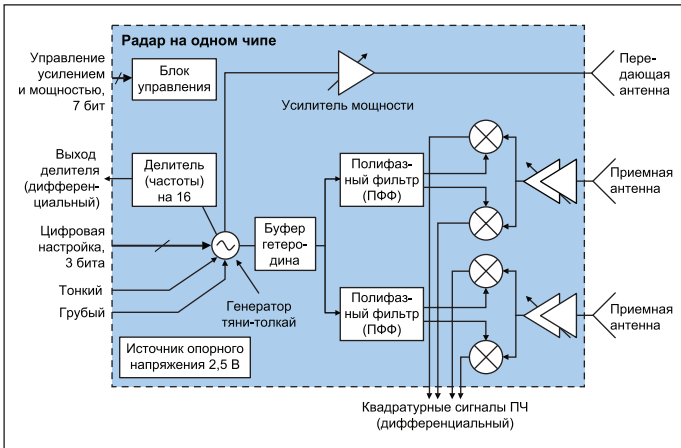


Рис. 5. Структурная схема TRXS_024_05

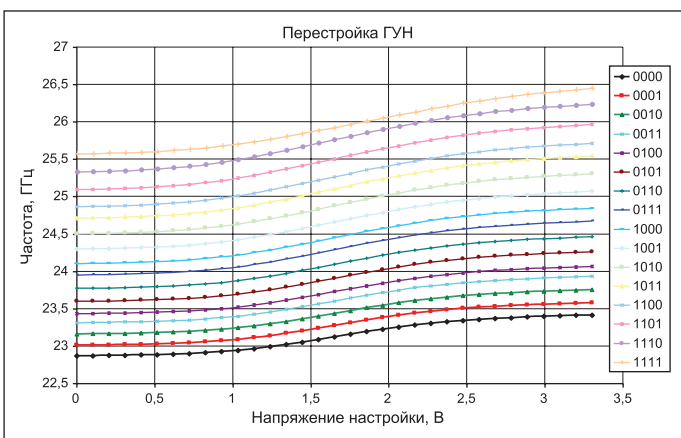


Рис. 6. Диапазоны частот ГУН у TRXS_024_05

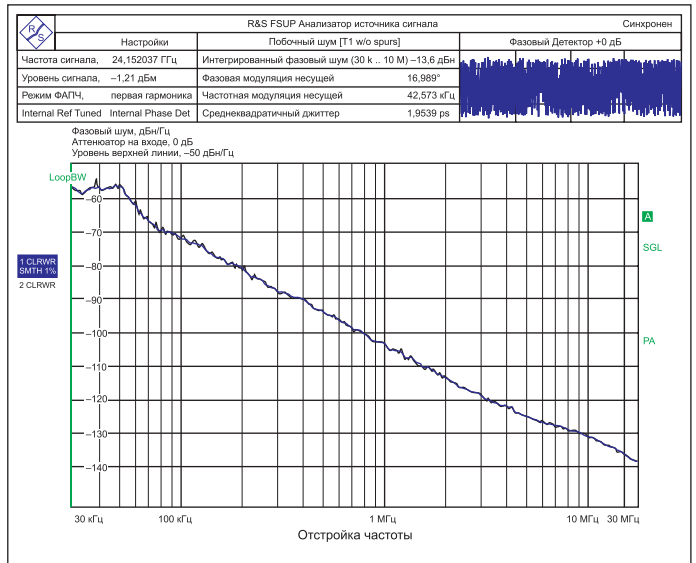


Рис. 7. Фазовые шумы для TRXS_024_05

Таблица 2. Микросхемы для диапазона ISM 122 ГГц компании Silicon Radar

Микросхема	Название	Частота, ГГц		Питание		Выходная мощность, дБм	Усиление, дБ	Поставляется в виде кристалла	Корпус	Размер корпуса, мм
		min	max	Напряжение, В	Ток, мА					
TRX_120_001*	Приемопередатчик	119,1	125,9	3,3	112	3***	8	Да	QFN-56	8×8
TRX_120_002**	Приемопередатчик	119	125,4	3,3	112	3***	8	Да	QFN-32	5×5

Примечания. * Имеет встроенную антенну внутри корпуса QFN.
 ** Имеет встроенную антенну снаружи корпуса QFN.
 *** Подводимая мощность к антенне.

коэффициентом делителя частоты, 8 против 32 соответственно. ГУН у этих микросхем может работать в двух режимах:

- узкополосном, когда перестройка на напряжении 0–3,3 В производится по входу V_{ctrl} в одном из 16 поддиапазонов. Его выбор осуществляется 4-разрядным кодом на входах D0–D3. Как видно на рис. 3, поддиапазоны перекрываются. Один поддиапазон обеспечивает перестройку в пределах 500–600 МГц;
- широкополосном, когда цифровые входы D0–D3 соединены с V_{ctrl} и обеспечивается полный диапазон перестройки 23,3–26,2 ГГц.

Характеристика фазовых шумов ГУН для TRX_024_006 показана на рис. 4.

Приемопередатчик TRXS_024_005 [7] имеет два приемных канала и делитель частоты на 16; его структурная схема показана на рис. 5. Пока доступны лишь предварительные данные устройства. Характеристики его ГУН в зависимости от напряжения на входе V_{ctrl} и выбранного поддиапазона с помощью цифровых входов D0–D3 представлены на рис. 6, а характеристика фазовых шумов — на рис. 7. Решение планируется запустить в массовое производство в 2017 году, на данный момент доступны образцы по процессу MPW.

Приемопередатчики ISM-диапазона на 122 ГГц

На данный момент компания Silicon Radar предлагает два приемопередатчика:

- TRX_120_001 [8] с приемной и передающей антеннами, которые выполнены на керамической подложке, встроенной в корпус QFN-56 (8×8 мм). В этом месте сверху корпуса удален пластик для получения лучших характеристик, и антенны хорошо видны, каждая из них состоит из 4 элементов (рис. 8, 9);
- TRX_120_002 с приемной и передающей антеннами, которые выполнены в едином техпроцессе на кристалле. Они представляют собой два полуволновых вибратора, и их ДН шире по сравнению с первой микросхемой, а сам чип дешевле в производстве. Приемопередатчик будет выпускаться в корпусе QFN-32 (5×5 мм), освоение серийного производства планируется на лето 2017 года.

Документация на устройства доступна по запросу. Их структурная схема показана на рис. 10, а краткие характеристики приведены в таблице 2.

Данные микросхемы имеют также два режима работы ГУН:

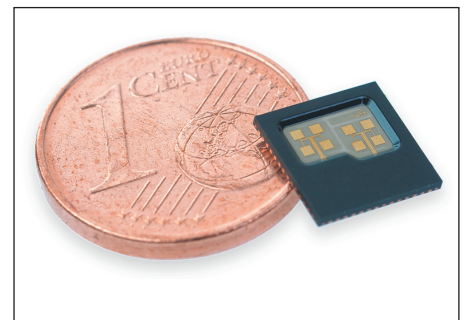


Рис. 8. Внешний вид микросхемы TRX_120_001

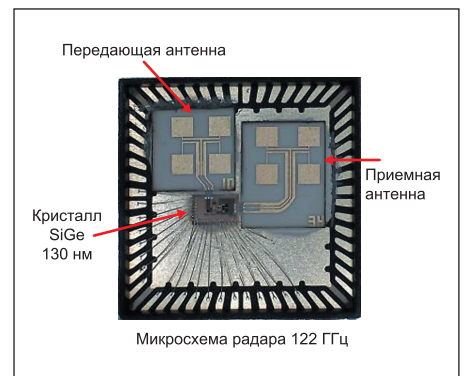


Рис. 9. Микросхема TRX_120_001 со снятой крышкой

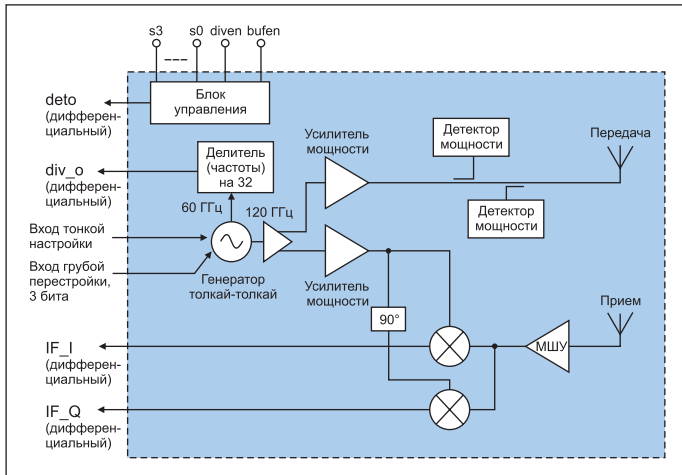


Рис. 10. Структурная схема TRX_120_001/002

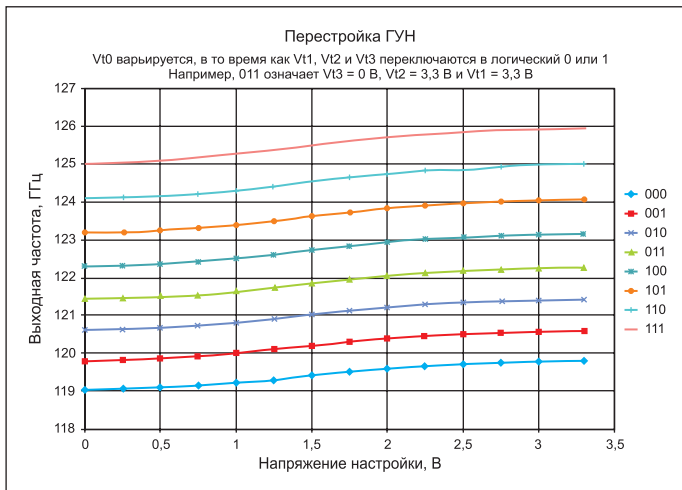


Рис. 11. Диапазоны частот ГУН для TRX_120_001/002

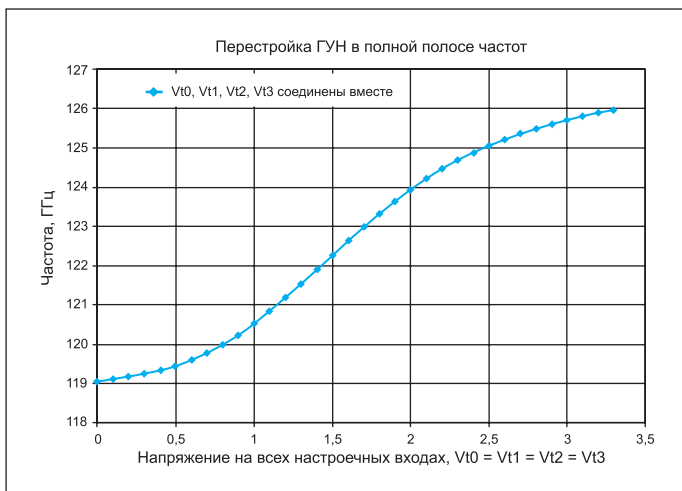


Рис. 12. Широкополосная перестройка ГУН для TRX_120_001/002

- в первом диапазоне перестройки разбит на 8 поддиапазонов, которые выбираются цифровыми входами Vt1–Vt3. Перестройка в поддиапазоне осуществляется в пределах 800–950 МГц с напряжением на входе Vt0 (рис. 11);
- во втором случае входы Vt0–Vt3 соединены между собой, и обеспечивается полный диапазон перестройки 118–126 ГГц (рис. 12).

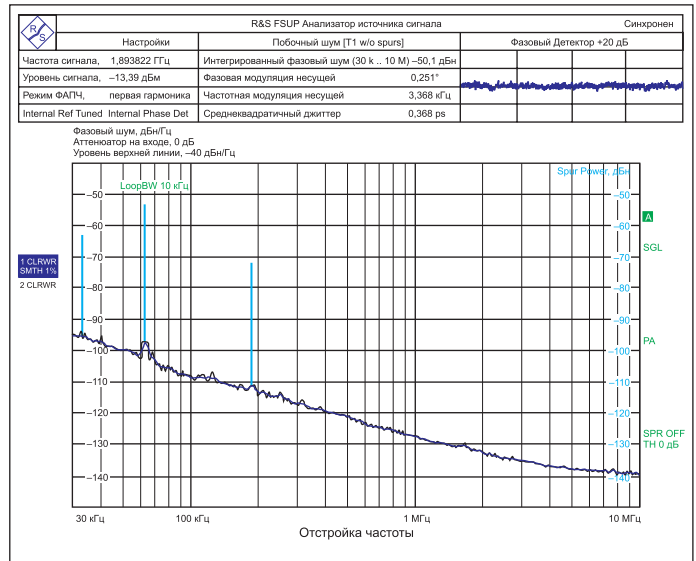


Рис. 13. Фазовые шумы ГУН после делителя частоты для TRX_120_001/002

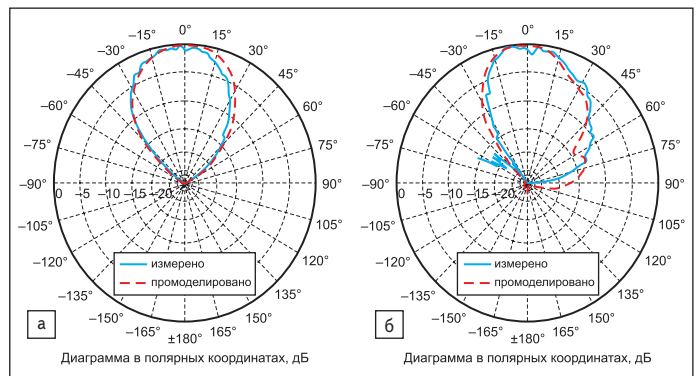


Рис. 14. Диаграммы направленности антенн для TRX_120_001/002 в плоскостях: а) Н-; б) Е-

Спектр с выхода делителя частоты показан на рис. 13. Поскольку при делении шумы улучшаются согласно формуле $20 \times \log(N)$, а общий коэффициент деления 64 (есть встроенный делитель на 32; ГУН на 60 ГГц; выходная частота вычисляется умножением на 2), шумы на 122 ГГц будут как минимум на 36 дБ хуже.

То, что обе микросхемы имеют встроенные антенны, резко расширяет их диапазон применения. Диаграммы направленности антенны для двух плоскостей (Е- и Н-) для TRX_120_001 показаны на рис. 14. Поскольку на частоте 122 ГГц длина волны составляет порядка 2,45 мм, то начинают работать квазиоптические принципы. Это позволяет использовать дополнительные фокусирующие линзы либо зеркала-отражатели, как у обычного фонарика. Линза диаметром 32 и высотой 12 мм, расположенная на расстоянии примерно 12 мм, позволяет получить диаграмму направленности (ДН) модуля около 5°. Дисперсия луча объясняется тем, что приемная и передающая антенны имеют конечные размеры и разнесены в пространстве (рис. 8), поэтому даже в случае идеальной линзы их нельзя разместить точно в ее фокусе. Для получения более узкого луча можно расположить фокусирующую линзу дальше от микросхемы. Это, однако, приводит к увеличению размеров линзы и ее удорожанию. Можно пойти по другому пути и использовать одну приемопередающую антенну вместо двух. Так, у компании Silicon Radar есть экспериментальный проект, где предусмотрена одна приемопередающая антенна, с ней была получена ДН модуля порядка 2°. Узкий луч увеличивает дальность работы и разрешающую способность и особенно важен для промышленных применений и систем технического зрения.

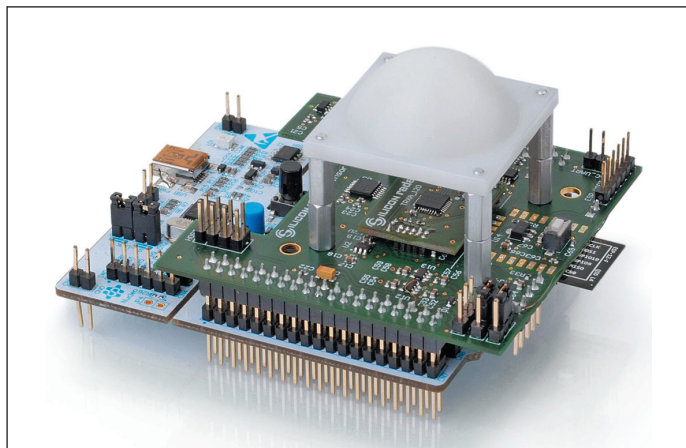


Рис. 15. Демонстрационный комплект Easy Radar Kit

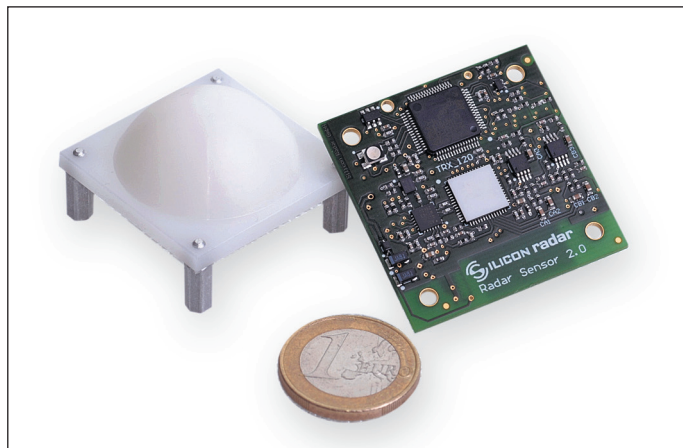


Рис. 16. Демонстрационный комплект Simple Radar Kit

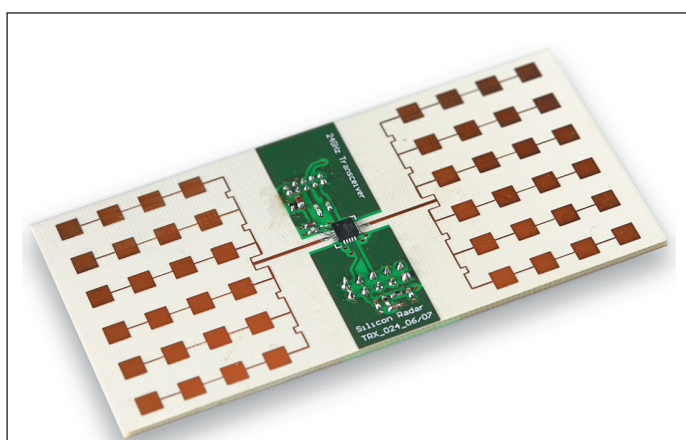


Рис. 17. Антенна с приемопередатчиком TRX_024_007 24 ГГц

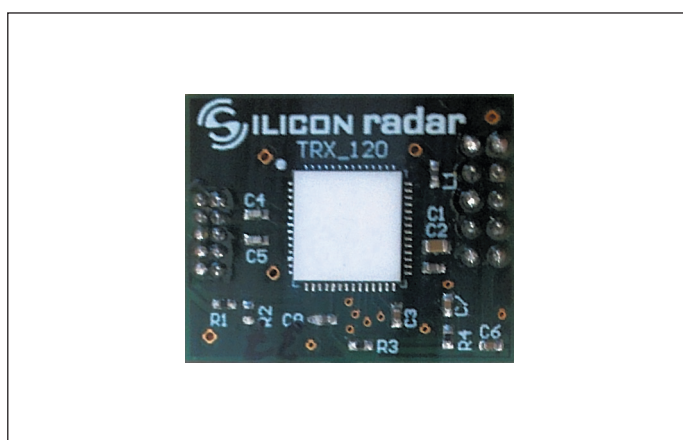


Рис. 19. Плата с приемопередатчиком 122 ГГц

Демонстрационные комплекты для 24 и 122 ГГц

В настоящее время компания Silicon Radar предлагает две версии демонстрационных комплектов:

- Easy Radar Kit (рис. 15), содержащий плату с приемопередатчиком и антенной на 24 ГГц (элемент No1); плату с приемопередатчиком и антенной на 122 ГГц (No2); фокусирующую линзу на 122 ГГц (No3); плату формирования ЛЧМ-сигналов (No4)

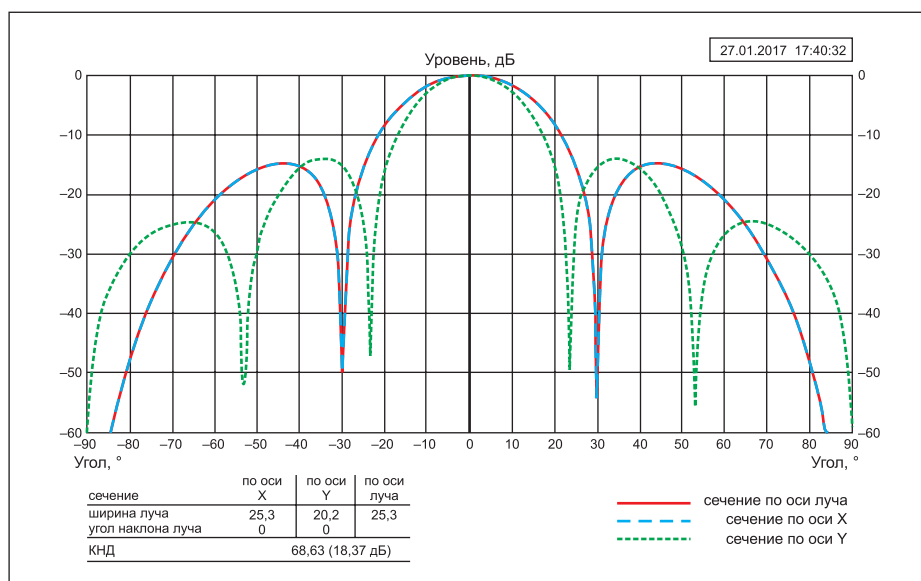


Рис. 18. Диаграмма направленности печатной антенны 24 ГГц

со встроенным модулем Wi-Fi ESP8266; плату МК (No5); программное обеспечение (No6) и документацию (No7).

- Simple Radar (рис. 16), включающий плату размерами 40×40 мм, на которой находится 122-ГГц приемопередатчик, формирователь ЛЧМ и управляющий микроконтроллер серии STM32F; фокусирующая линза; программное обеспечение и документация. Остановимся на элементах No1–No7 демонстрационного комплекта Easy Radar подробнее.

- No1, плата размером 80×40 мм, с антеннами на 24 ГГц и приемопередатчиком TRX_024_006/007, показана на рис 17. Антенна для приема сигнала из 24 печатных элементов (6×4) находится слева, а для передачи — справа. Диаграмма направленности одной такой антенны, рассчитанная в программе Fazar, показана на рис. 18 и составляет 25°/20° в обеих плоскостях. Поскольку при приеме и передаче сигнала эти ДН складываются, результирующая ДН приемопередатчика будет примерно 20°/15°. Выводы микросхемы TRX_024_006/007 D0–D3, Vctrl соединены между собой, что позволяет получить полный диапазон перестройки 23,2–26,4 ГГц.

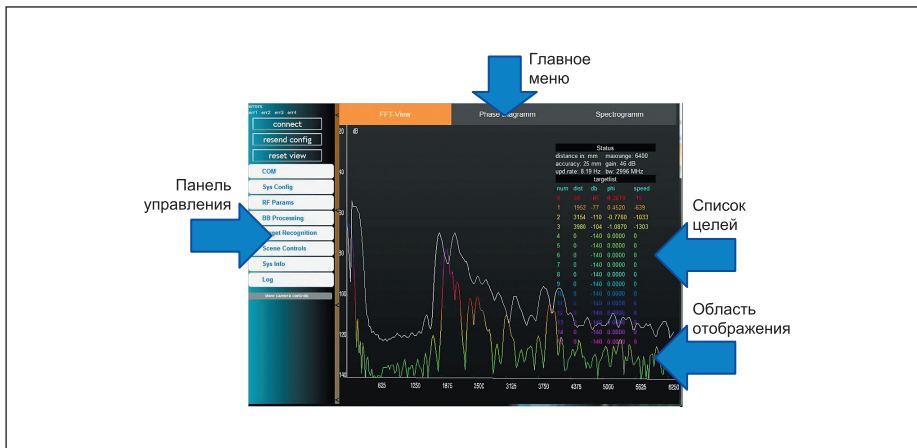


Рис. 20. Графический интерфейс пользователя

- No2, плата размером 25×20 мм, с передатчиком TRX_120_001 и интегрированной в его корпус антенной, показана на рис. 19. Для получения более узкого луча сверху монтируется фокусирующая линза. Результирующая ДН такой системы в 5° была подтверждена экспериментально. Высота расположения линзы над корпусом QFN-56 критична и позволяет сформировать более узкий или широкий луч на заданном расстоянии.
- No3, фокусирующая линза с размерами основания 35×35×3 мм, показана на рис. 15. Диаметр самой широкой части составляет 32 мм, ее высота над основанием — 12 мм. Фокус линзы находится примерно в 10 мм от основания. Изготовлена из полиэтилена высокой плотности (HD PE) механическим способом. С помощью экспериментов на Easy Radar Kit было установлено, что положение линзы относительно микросхемы существенно. Как показано на рис. 21, 22, правильная постановка линзы увеличивает уровень отраженного сигнала примерно на 45 дБ. Так как встроенные в QFN-56 антенны смещены от центра корпуса

примерно на 2 мм (что наглядно видно на рис. 8, 9), оптическая ось линзы должна проходить через эту точку. Установка же линзы точно по центру корпуса приводит к падению уровня отраженного сигнала на 10 дБ. На данный момент компания Silicon Radar отдельно не продает фокусирующие линзы, хотя и рассматривает этот вопрос. Проводятся эксперименты по использованию фокусирующих линз для светодиодов, что, возможно, позволит в будущем удешевить производство линз с сохранением их характеристик.

- No4, плата для формирования ЛЧМ-сигналов, имеет габариты 70×70 мм и подключается непосредственно к плате МК (No4) через два разъема DB40 (это вторая плата снизу на рис. 15). Модуль Wi-Fi ESP8236-12 размером 24×16 мм припаян снизу и на 8 мм выдается за габариты основной платы. Режимы работы задаются переключателем SW1. Для использования Wi-Fi-модуля надо также переключить контакты MT-WR (Microcontroller Transmit — WiFi Receive) и MR-WT (Microcontroller Receive — WiFi Transmit). Свободные пере-

мычки предусмотрены снизу платы МК, на разъемах CN11 и CN12. Формирование ЛЧМ-сигнала выполнено на базе микросхемы ADI ADF4159, к которой платы No1 и No2 подключаются через разъемы CN1 (2×5, шаг 1,27 мм) и CN2 (2×5, шаг 2 мм). В ранних вариантах изделия из-за небольшой разницы в высоте этих разъемов обе верхние платы встают с небольшим перекосом. В последних версиях комплекта данный недостаток устранен. К особенностям платы следует отнести также яркий трехцветный светодиод, который виден издали и индицирует различные режимы работы (может управляться программно).

- No5, или STM32 Nucleo-F303RE, является отладочной платой компании STM. Работа с ней осуществляется стандартными средствами — программой STM32 ST-Link Utility [9], которая позволяет считать или записать содержимое флэш-памяти МК. В комплекте с этой утилитой также поставляются драйверы COM-порта.
- No6 — программное обеспечение Install Package.zip, загружаемый с сервера компании файл, который содержит документацию на модуль, включая подробное описание протокола обмена; прошивки для микроконтроллера в формате .BIN; USB-драйверы; Com2Websocket.jar для открытия/закрытия COM-порта; демонстрационная программа на index.html.
- No7 — документация, состоящая из .PDF-файлов. Это руководство пользователя [10] и описание протокола [11], доступные для скачивания на сайте компании.

Подключение персонального компьютера к Easy Radar Kit осуществляется стандартным USB-кабелем либо через Wi-Fi-интерфейс. Перед запуском основной программы необходимо запустить Com2Websocket.jar и выбрать виртуальный COM-порт. Подразумевается, что на ПК установлена 32 VM Java не ниже 9-й версии.

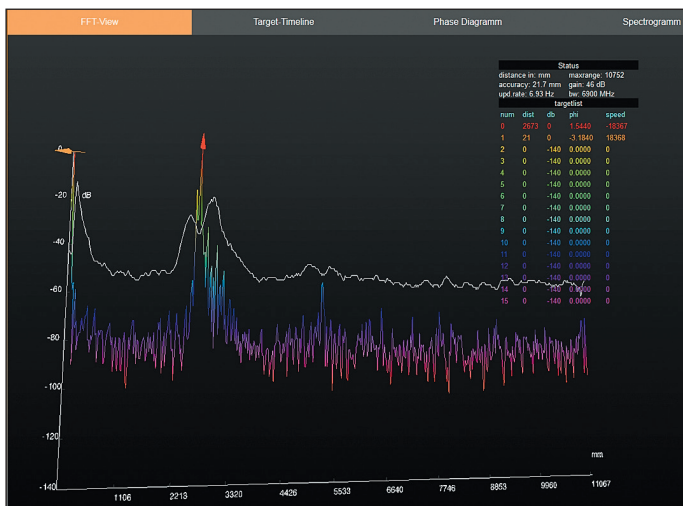


Рис. 21. Спектр с фазовыми маркерами, без фокусирующей линзы

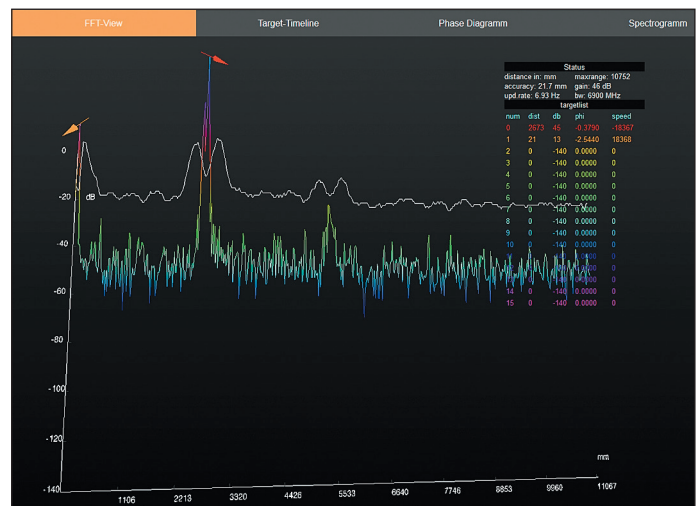


Рис. 22. Спектр с фазовыми маркерами, с фокусирующей линзой

Таблица 3. Скорость оцифровки и время свипа в зависимости от ADC Clock Divider

ADC Clock Divider	T _{smp} , число тактов АЦП	Расчетное время свипа для 512 точек, мкс	Расчетное время свипа для 1024 точек, мкс	Расчетное время свипа для 2048 точек, мкс	Скорость оцифровки, млн отсчетов/с
0	14	207,0755556	414,1511111	828,3022222	2,5
1	15	221,8666667	443,7333333	887,4666667	2,4
2	17	251,4488889	502,8977778	1005,7955556	2,1
3	20	295,8222222	591,6444444	1183,2888889	1,8
4	32	473,3155556	946,6311111	1893,2622222	1,1
5	74	1094,5422222	2189,0844444	4378,1688889	0,4
6	194	2869,4755556	5738,9511111	11477,9022222	0,1
7	614	9081,7422222	18163,4844444	36326,9688889	0,05

Запуск основной программы выполняется открытием веб-страницы *index.html* в браузере. Ее графический интерфейс в браузере Mozilla Firefox 5.0 показан на рис. 20. Цветной линией выводится спектр сигнала, белой — порог детектирования. В правом верхнем углу отображается служебная информация и список целей, превышающий заданный порог, с их параметрами. С левой стороны окна находится несколько вкладок, которые позволяют конфигурировать модуль.

По умолчанию модуль настроен на Wi-Fi, поэтому при работе через USB необходимо изменить настройку внизу вкладки Sys Config и только потом нажать кнопку Connect в левом верхнем углу основной страницы.

На вкладке Sys Config пользователь может выбрать информацию, которую модуль транслирует ПК:

- Range-frame, или амплитудный спектр;
- Sfar-frame, или уровень шума, цель детектируется при его превышении;
- Phase-frame, или фазовый спектр;
- Targetlist-frame, или список целей и данных о них;
- Statuslist-frame, передает служебную информацию: единицы расстояния, максимальная дистанция, точность ее измерения, усиление, интервал между измерениями, полоса свипа;
- Extdata-frame, расширенный формат данных, пока не реализован.

На этой же вкладке можно включать или выключать систему АРУ (AGC) или устанавливать уровень усиления вручную. При включенной АРУ модуль снимает два предварительных свипа для определения необходимого усиления, что несколько увеличивает общее время сбора данных.

Как известно, для формирования ЛЧМ требуется задать его начальную и конечную частоту, ширину полосы и крутизну перестройки, длительность ЛЧМ. Для оцифровки сигнала ПЧ следует дополнительно указать требуемое число точек для оцифровки и интервал между ними. Параметры оцифровки и ЛЧМ-сигнала взаимосвязаны, и соотношение между ними устанавливается автоматически. То есть изменение одного параметра вызывает изменение связанных с ним характеристик.

На вкладке RF Params пользователь может задать:

- bandwidth (полоса свипирования) в МГц;
- base-frequency (начальная частота) в МГц;

• frontend (тип модуля: 24, 60, 122 ГГц), от этого зависит делитель частоты для ГУН (модуль 60 ГГц скоро планируется включить в комплект Easy Radar Kit).

На вкладке BB Processing пользователь может задать:

- ADC Clock Divider (делитель частоты для АЦП), 0–7, этот параметр совместно с числом точек влияет на реальную длительность свипа, который транслируется модулем, рассчитывается по формуле (1). Зависимость T_{smp} от ADC Clock Divider и примеры расчетов по этой формуле даны в таблице 3.
- Number of Samples (количество точек для оцифровки) — 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096; чем больше точек, тем длиннее свип;
- Number of Ramps (число свипов) — 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, число усредняемых реализаций перед БПФ;
- Downsampling (субдискретизация), 0–64, позволяет улучшить разрешение до 1 мм, однако мощность сигнала при этом сильно падает;
- FFTsize (размер БПФ) — 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096;
- Average (усреднение после БПФ), 0–7, 1 означает усреднение двух спектров.

$$T_{sweep} [\text{мкс}] = T_{smp} [\text{тактов}] \times 1,04 \times N_{smp} / 36 [\text{МГц}], \quad (1)$$

где T_{sweep} — расчетное время свипа; T_{smp} — число тактов АЦП между отсчетами, зависит от ADC Clock Divider; N_{smp} — число точек для оцифровки.

Не все комбинации, тем не менее, работоспособны и зависят от конкретной прошивки платы с МК. Значения, подтвержденные на практике, обозначены в таблице 3 серым цветом.

Разрешающая способность по расстоянию для ЛЧМ — сигнала рассчитывается по формуле (2):

$$acc = (c \times N_{smp}) / (2 \times BW \times N_{fft} \times N_{down}), \quad (2)$$

где c — скорость света, 3×10^8 м/с; BW — ширина свипа ЛЧМ-сигнала, Гц; N_{smp} — количество отсчетов, полученных АЦП; N_{fft} — размер БПФ; N_{down} — степень субдискретизации.

Если субдискретизация не используется и $N_{smp} = N_{fft}$, формула упрощается как:

$$acc = c / (2 \times BW). \quad (3)$$

Для $BW = 6900$ МГц расчет дает 0,021739 м, или 21,7 мм, как можно видеть на рис. 21, 22.

Обработка фазовой информации от принимаемого сигнала позволяет получить субмиллиметровую точность измерения расстояния. Для демонстрации фазовой информации на вкладке сверху FFT-View надо включить фазовые маркеры (phase markers). При этом на пиках спектрограммы появляются стрелочки, отображающие информацию о фазе (рис. 21). На этом рисунке хорошо видно отражение от потолка, который находится на расстоянии 2,673 м, уровень сигнала 0 дБ, его фаза 1,544 радиан (0-й пункт в списке целей targetlist, колонки dist, db и phi). Данные получены при 1024 точках оцифровки и таком же размере БПФ, с усреднением по выборкам 8, при длительности свипа 9106 мкс и без фокусирующей линзы. Во фрейме status указаны следующие параметры: полоса свипирования 6900 МГц; разрешение по дальности 21,7 мм; предельная дальность 10,752 м; частота выборок 6,93 Гц; усиление 46 дБ. На рис. 22 приведена аналогичная картинка с использованием фокусирующей линзы, уровень сигнала при этом вырос до +45 дБ, его фаза 0,379 радиан (0-й пункт в списке). Хотя стрелочки и колеблются, тем не менее при удалении объекта на доли миллиметра (при нажатии рукой на стол) они вращаются по часовой стрелке. При приближении объекта (отпускании стола) они вращаются в обратную сторону и занимают исходное положение.

Важной особенностью набора Easy Radar Kit является открытый протокол, который

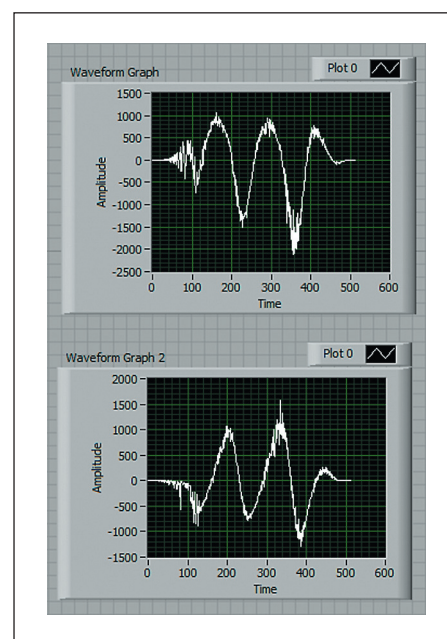


Рис. 23. Сигналы на входе АЦП, I/Q-каналы по 512 отсчетов

Таблица 4. Перспективные разработки компании Silicon Radar

Назначение	Частота	Описание	Наличие образцов
Приемник	9,6 ГГц	Маломощный преобразователь частоты вниз	Да
Приемник	36 ГГц	Маломощный преобразователь частоты вниз, 4 входа	Да
Фазовая решетка	122 ГГц	Два чипа: с наружными и встроенными антеннами (4TX & 4RX)	Да
ММО «Радар»	140 ГГц	Tx/Rx-чип с интегрированной антенной, Tx/Rx-чип с внешней антенной, TRX с переключателем MEMS	Да
ММО «Радар»	245 ГГц	Микросхемы приемника и передатчика с интегрированными антеннами	Да

позволяет использовать его для создания прототипов устройств. Он подробно описан в [11]. Наиболее простой способ коммуникации с модулем — применение программы RealTerm [12], разрешающей как посылать команды, так и сохранять поток данных в файл. Надо отметить, что работы над программным обеспечением еще ведутся, и не вся его функциональность, к сожалению, действует так, как это описано. Работа с модулем в таком режиме рассчитана на продвинутого пользователя. Текстовые команды, отправляемые модулю, можно посмотреть в левом нижнем углу экрана во вкладке Log.

Основной интерес представляет получение сырых данных с АЦП. Это возможно в двух вариантах: непосредственно данные оцифровки и уже с наложением на них окна Humming'a, что необходимо для последующего БПФ. Пример такого сигнала, отраженного от углового отражателя на расстоянии примерно 30 см от модуля, два канала I/Q по 512 отсчетов, построенного средствами LabView, показан на рис. 23.

Перспективные разработки

Компания Silicon Radar осуществляет и заказные разработки. При этом в ряде случаев клиент имеет на них эксклюзивные права, поэтому подробная информация о подобных проектах не раскрывается. Тем не менее на своем сайте компания предоставляет о них краткую информацию, и наиболее интересные разработки представлены в таблице 4.

К полузакрытым проектам относятся также приемопередатчики 60 ГГц, которые Silicon Radar серийно выпускает для компании Innosent; приемопередатчики на 77–79 ГГц; радар с длительностью моноимпульса 2 нс – 4 пс, амплитудой 400 мВ; радар с импульсом длительностью 1 нс на несущей порядка 26 ГГц. Последние разработки используются для измерения толщины тонких пленок.

Инновационные микросхемы компании Silicon Radar уже получили признание на мировом рынке. Есть основания полагать, что они найдут широкое применение и в России. ■

Литература

1. www.siliconradar.com/
2. www.siliconradar.com/publications_e.html
3. Winkler W., Borngräber J. et al. 60GHz and 76GHz Oscillators in 0.25 μ m SiGe: C BiCMOS. ISSCC Digest of Technical Papers. San Francisco, February 2003.
4. Winkler W., Borngräber J. et al. 122 GHz lownoise amplifier in SiGe technology. Proc. ESSCIRC, 2009.
5. Debski W., Winkler W., Borngräber J. 240 GHz transmitter and receiver for 3D imaging system in SiGe BiCMOS technology. European Microwave Integrated Circuit Conference (EuMIC), 9th, Rome, 2014.
6. Документация на TRX_024_006. www.siliconradar.com/datasheets/Datenblatt_TRX_024_06_v1.5.pdf
7. Документация на TRXS_024_005. www.siliconradar.com/datasheets/Datenblatt_TRXS2_024_05.pdf
8. Документация на TRX_120_001. www.siliconradar.com/datasheets/160721_Datenblatt_TRX_120G.pdf
9. STM32 ST-Link Utility. www.st.com/en/embedded-software/stsw-link004.html
10. User Guide: Evaluation Kit EasyRadar. www.siliconradar.com/datasheets/UserGuide_EasyRadar.pdf
11. User Guide: Silicon Radar sensor protocol. www.siliconradar.com/datasheets/160627_short_desc_protocol.pdf
12. Программа для работы с COM-портом. www.realterm.sourceforge.io/