

# SILICON RADAR: О ДИСТАНЦИОННОМ ИЗМЕРЕНИИ ДЫХАНИЯ И ПУЛЬСА

Задача дистанционного измерения пульса актуальна как для медицинских целей, так и для идентификации живых объектов с помощью робототехники. В статье представлено решение этой задачи с использованием демонстрационного комплекта SiRad Easy компании Silicon Radar [1] и приемопередатчика TRX\_120\_001 [2] в его составе, который работает не только в нелицензируемом в РФ диапазоне ISM 122–123 ГГц, но и за его пределами.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ

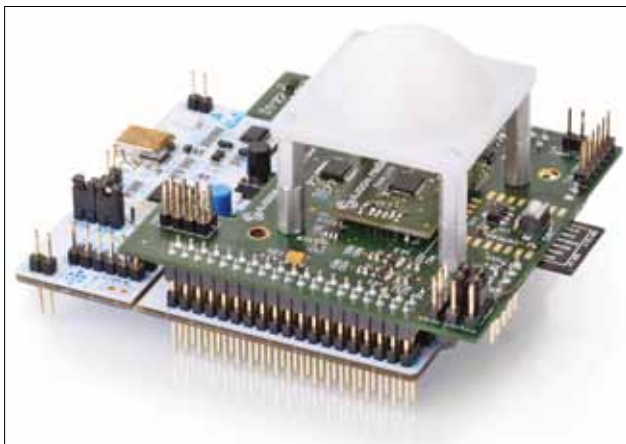
Принцип работы ЛЧМ-радаров основан на линейной модуляции зондирующего сигнала. Поскольку отраженный от объекта сигнал запаздывает на время, прямо пропорциональное расстоянию до этого объекта, ПЧ разностного сигнала, который получается смешиванием зондирующего и отраженного сигналов, также пропорциональна расстоянию до объекта. Эти соотношения выражаются формулой:

$$F_{ПЧ} = 2 \cdot BW \cdot R / (T \cdot c), \quad (1)$$

где  $F_{ПЧ}$  — промежуточная частота, Гц,  $BW$  — полоса модуляции сигнала ЛЧМ, Гц,  $T$  — длительность сигнала ЛЧМ, с,  $R$  — расстояние до объекта, м,  $c$  — скорость света, м/с.

Далее ПЧ оцифровывается АЦП и переносится в частотную область с помощью БПФ. Алгоритм БПФ, используемый для обработки сигналов, широко описан в литературе, например в [3]. Учитывая, что оцифровка сигнала производится за время свипа  $T$ , минимальная ПЧ, определяемая с помощью БПФ, равна  $1/T$ . Поскольку отсчеты БПФ кратны этой частоте, она также определяет точность, с которой определяется ПЧ в амплитудном спектре. Таким образом, ей соответствует минимальная дальность, определяемая с помощью БПФ, а также точность, с которой определяется расстояние до объекта. При подстановке  $F_{ПЧ} = 1/T$  формула (1) принимает вид:

$$1 = BW \cdot 2 \cdot R_p / c, \quad (2)$$



▲ Рис. 1. Демонстрационный комплект SiRad Easy с модулем 122 ГГц

$$\text{или } R_p = c / 2 \cdot BW, \quad (2a)$$

$$\text{или } F_{ПЧ\_P} = 2 \cdot BW / c, \quad (2б)$$

где  $R_p$  — точность по расстоянию, м,  $F_{ПЧ\_P}$  — точность БПФ по частоте, Гц.

Таким образом, точность по расстоянию в амплитудном спектре зависит лишь от скорости света и ширины полосы модуляции, и, что важно, не зависит от времени свипа. Подставив в формулу (2a)  $BW = 7300$  МГц, получим:  $R_p = 3 \cdot 10^8 / 2 \cdot 7,3 \cdot 10^9 = 3/146 = 0,02054$  м, или 20,54 мм.

Количество отсчетов БПФ за время  $T$  определяет требуемую частоту дискретизации АЦП и максимальную дальность, определяемую БПФ.

$$R_{МАКС} = R_p \cdot N / 2, \quad (3)$$

где  $N$  — количество отсчетов в выборке (для БПФ кратно степени 2),  $R_{МАКС}$  — максимальная дальность, определяемая БПФ, м.

$$F_{АЦП} = (N-1) / T_B, \quad (4)$$

где  $F_{АЦП}$  — требуемая частота дискретизации АЦП, Гц,  $T_B$  — время сбора данных, с.

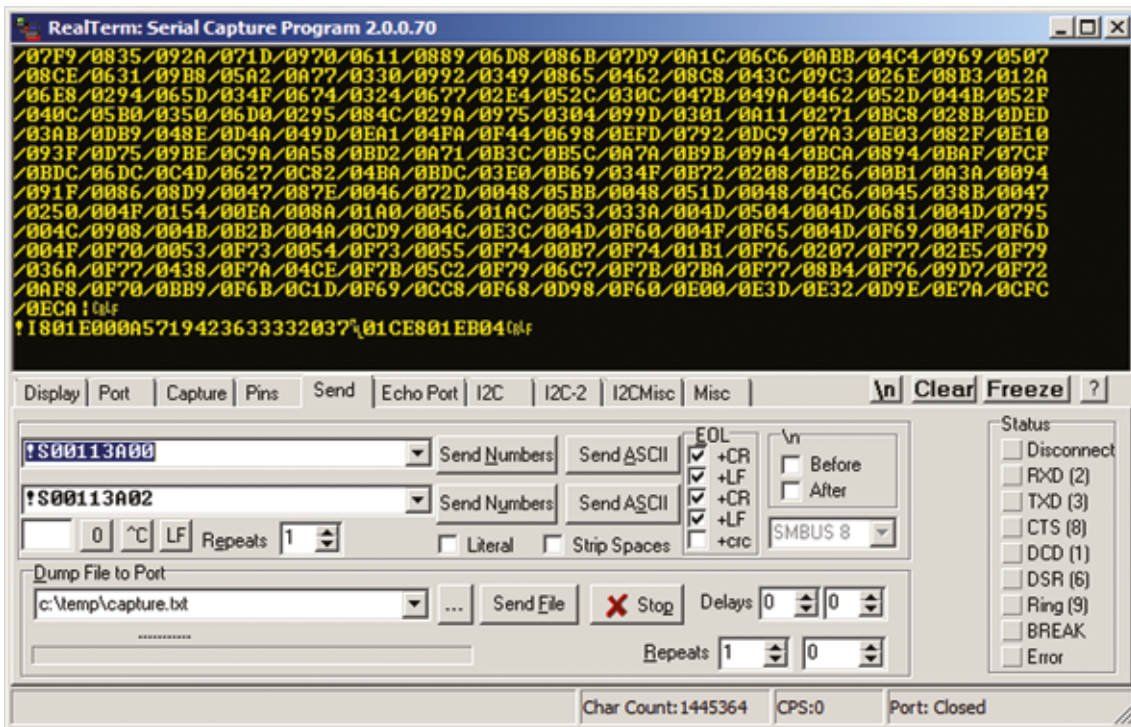
Поскольку на практике требуемая частота дискретизации не всегда реализуема, длительность ЛЧМ-сигнала, как правило, несколько превышает время оцифровки.

Для 128 отсчетов формула (3) даст нам:  $R_{МАКС} = 0,02054 \cdot 128 / 2 = 1,31456$  м.

Точность по расстоянию в амплитудном спектре 20,54 мм не является достаточной для решения нашей задачи. Тем не менее, как покажет эксперимент, учет набега фазы обеспечит субмиллиметровую точность. Поскольку радар фактически измеряет расстояние до грудной клетки, которое меняется под воздействием дыхания и пульса, человек при измерении должен быть неподвижен.

## КОНФИГУРАЦИЯ КОМПЛЕКТА SIRAD EASY И СБОР ДАННЫХ

Комплект SiRad Easy [4] компании Silicon Radar работает с 24- и 122-ГГц модулями. Первый выполнен на основе приемопередатчика TRX\_024\_007, второй — TRX\_120\_001. Этот комплект



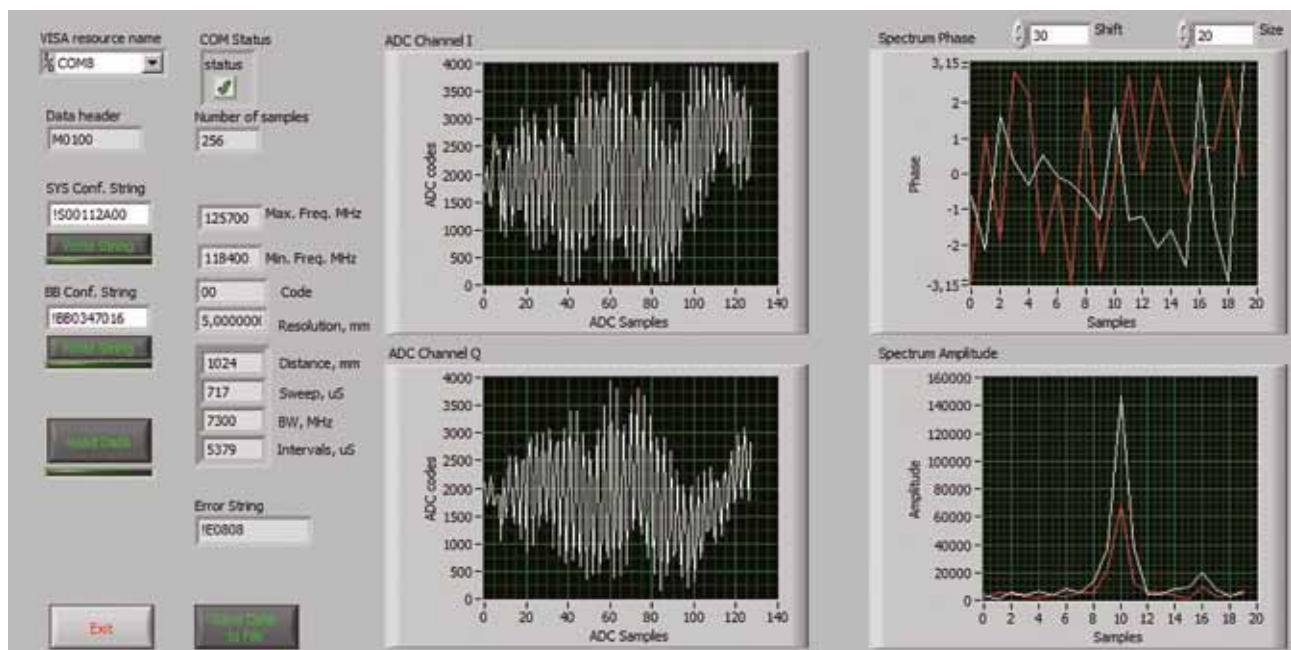
▲ Рис. 2. Пакет данных, принятый программой RealTerm

довольно подробно описан в [5], как и его модификация SiRad Simple. Внешний вид SiRad Easy со 122-ГГц модулем показан на рис. 1. Пластиковая линза, используемая для фокусирования сигнала, позволяет получить диаграмму направленности  $5^\circ$ , что на расстоянии в 80 см соответствует области диаметром около 7 см. Мы будем получать «сырые» данные с АЦП модуля через COM-порт с помощью программы RealTerm [6], а их обработку проводить на ПК позже с помощью LabView.

Частота сердечного пульса в норме, как правило, составляет 60–90 ударов в минуту, или примерно один–полтора раза в секунду. Соответственно, для его достоверного определения требуется, чтобы частота съема данных составила около 10–15 раз в секунду. Несмотря на большую полосу, длительность свипа двух каналов I/Q по 512 точек у модуля равна все-

го 207–2869 мкс. К сожалению, скорость считывания данных через COM-порт невысока, фиксирована и составляет всего 230 400 бод [7]. Принимаемые программой RealTerm данные показаны на рис. 2. Для передачи одного отсчета АЦП используются пять байтов. Соответственно, выборка данных из 1024 отсчетов (два канала по 512 отсчетов АЦП) передается примерно за  $1024 \cdot 5 \text{ байтов} \cdot 8 \text{ (бит/байт)} / 230 \text{ 400 бод} = 0,18 \text{ с}$ , что означает около пяти реализаций в секунду.

Поскольку на практике эта цифра меньше и составляет около четырех реализаций, что неприемлемо для рассматриваемой задачи, мы уменьшим количество точек по двум каналам в четыре раза до 128, что увеличит скорость получаемых данных примерно до 15,3 реализаций в секунду (920 реализаций в минуту). Дальность работы радара при этом составит 1,024 м, а скорость



▲ Рис. 3. Окно вспомогательной программы

```

!801E000A571942363332037 01CE801EB04
!U5ж0019040002CD1C84E4DC
!E0808
M0100/0782/078E/0804/0793/0757/07A3/0896/07A2/0722/0792/0861/07A4/07EB/079A/
0812/0788/0824/080D/07B8/0846/067B/0783/0745/07BA/0796/0889/0648/07E6/0663/0
777/0739/0865/06AB/0847/0604/0778/075B/0820/072B/08AA/05D9/07AA/071A/07E8/0
7A8/08A9/06DC/086C/070E/0867/07D3/08FA/072C/094F/0672/0922/06EB/0967/067F/0
9C1/05A9/0A05/0525/098E/058E/09E5/0474/0A04/03C8/091E/0452/0928/0470/09C5/0
2A0/08EE/021C/07D4/02AA/07B9/023B/071B/0215/05C7/0337/05B0/03B1/062B/02C4/
049A/03D1/03D5/056D/04BF/04D4/03D1/054A/020D/07AE/02FE/0825/0320/07CE/01F
6/0A78/023C/0B92/038D/0AE0/0277/0CD8/02A7/0E0F/049E/0DEB/053B/0D9C/04AA/0
F60/05DB/0FB0/0806/0DAE/077C/0E6F/07D7/0F14/0A02/0C62/099F/0C3C/0978/0D1A
/0A96/0B22/0BB0/0980/0AC5/0A00/0B8C/0969/0CF4/06B8/0C01/0695/0B0E/0726/0D3
0/04FB/0C6A/0319/0AD6/03E5/0B7D/0197/0BD1/004C/096E/0113/0680/0058/098E/00
45/07A5/0048/06AD/004D/06F9/0044/0596/0044/03AF/0048/03A7/0048/0299/0049/010
E/00B7/0064/01DC/0052/01D2/0051/03B4/0050/04D9/004F/05C4/004B/0797/004C/09F
0/004C/0ABF/004B/0D28/004B/0E8A/004C/0F5F/004C/0F67/004C/0F6B/004F/0F6C/00
50/0F71/0051/0F76/0055/0F74/0057/0F74/0055/0F78/01F9/0F76/0274/0F77/025C/0F7
9/0358/0F7B/04D2/0F78/04A8/0F7C/0559/0F7B/0754/0F77/074F/077/07D2/0F79/0A2
7/0F72/0B14/0F70/0B02/0F6F/0C23/0F6B/0E0A/0F62/0D1A/0F63/0D81/0F60/0ED5/0D
2E/0F02/0C17/0DE0]

```

▲ Рис. 4. Массив данных с радарного модуля

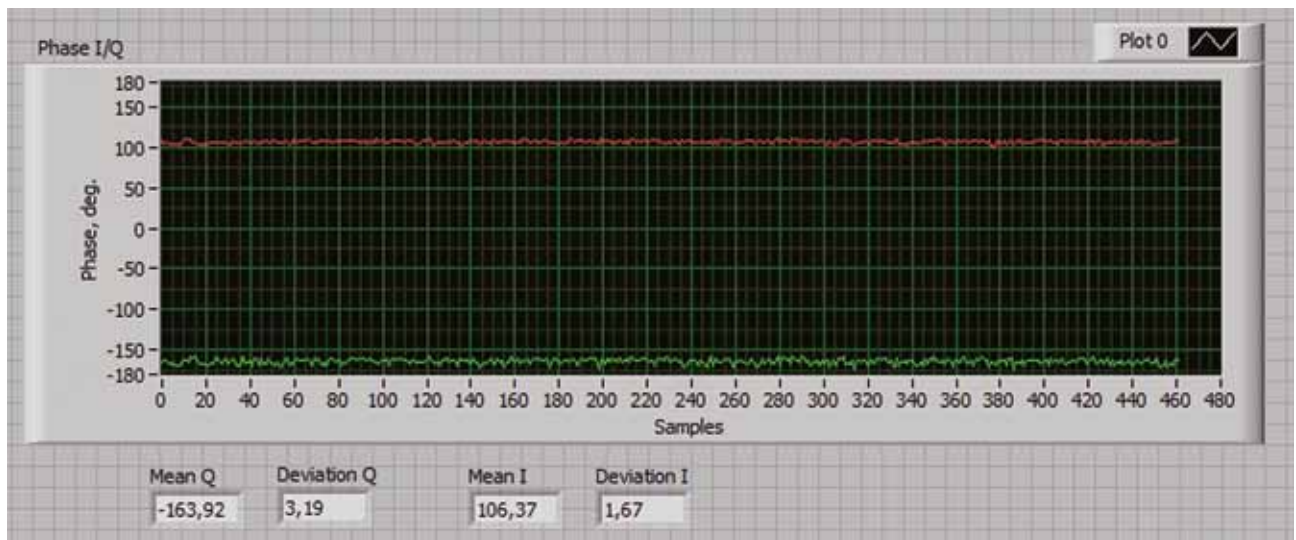
сви́па — 717 мкс. Эти параметры рассчитываются радарным модулем и высылаются по СОМ-порту перед данными.

Заметим, что в таком режиме работы за секунду радар излучает всего лишь 717 мкс:  $15,3 \text{ Гц} = 10\,970 \text{ мкс/с}$ , т.е. его скважность составляет около 91. В сочетании с невысокой излучаемой мощностью в районе  $-7...-1 \text{ дБм}$  [2], которая подводится к антенне TRX\_120\_001, можно утверждать, что средняя излучаемая мощность на человека не превысит 10 мкВт или  $-20 \text{ дБм}$ .

Режим работы комплекса конфигурируется текстовыми командами через СОМ-порт. Выбранную конфигурацию зададим с помощью командных строк !S00112A00 & !BV0347016, используя служебную программу на LabView. При этом модуль высылает в ответ свои текущие параметры: начальную и конечную частоты сви́па, максимальную дистанцию, время и полосу сви́па (рис. 3). Поскольку мы используем «сырые» данные АЦП, параметр Resolution не является актуальным. На двух диаграммах в центре рис. 3 показаны сигналы I/Q с АЦП, что позволяет оценить качество сигнала и отсутствие его ограничения со стороны АЦП. На диаграммах справа показаны ам-

Таблица. Девияция фазы на разном расстоянии, снятая по каналам I/Q

Расстояние, м	Девияция фазы, °	
	Мин.	Макс.
0,2	0,67	0,88
0,4	1,06	1,47
0,8	1,67	3,19
2,6	4,48	5,35



▲ Рис. 5. Фаза по каналам I/Q при отражении от уголкового отражателя

плитудный и фазовый спектр по каналам I/Q. Отметим, что «0» шкалы амплитудного спектра сдвинут на 30 отсчетов; таким образом, у нас оба максимума находятся на 40-м отсчете БПФ, что соответствует дальности 80 см. Почти точное попадание частоты ПЧ в 40-й отсчет БПФ видно также по равенству амплитуд смежных отсчетов (39 и 41).

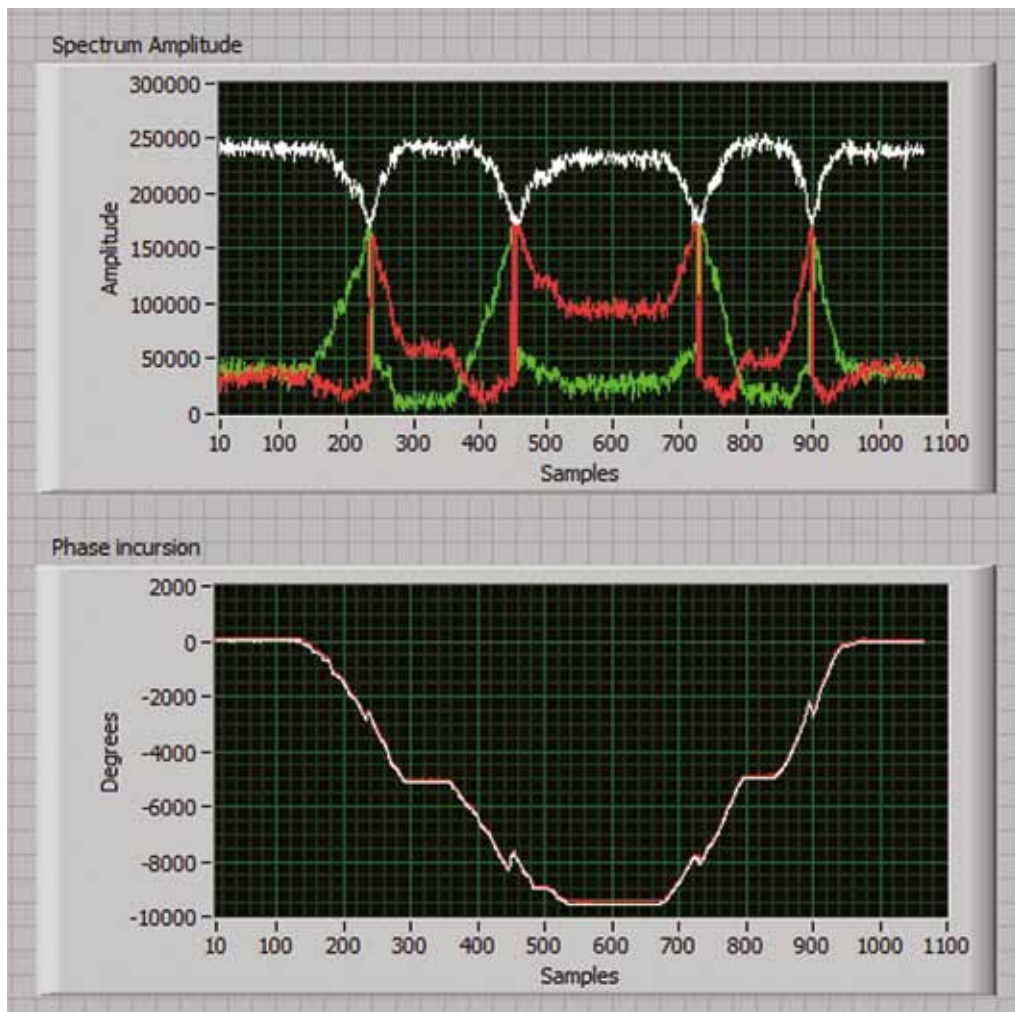
Теперь мы можем получать данные с АЦП «по запросу». При отправке команды !N (три раза) модуль в ответ выдает нам строки конфигурации и данные.

Для получения непрерывного потока данных сначала сконфигурируем Realterm для записи в данных в файл во вкладке Capture, затем пошлем команду !S00112A02. Радарный модуль начнет выдавать данные непрерывно, а программа RealTerm — сохранять их на диск. Для остановки выдачи данных и перевода модуля обратно режим «по запросу» пошлем команду !S00112A00. Данные в файле доступны для дальнейшей обработки (рис. 4). В начале пакета данных стоит маркер M0100, который означает размер передаваемой выборки в шестнадцатеричном формате. В данном случае 0100 (HEX) = 256 (DEC). Данные разделяются символом «/», каналы I/Q чередуются. Завершаются данные символом «\».

### О СТАБИЛЬНОСТИ ФАЗЫ

Оценим стабильность фазы при сильном отраженном сигнале на расстоянии 80 см от модуля. В качестве отражающего объекта используем треугольный уголкового отражателя, изготовленный из фольгированного стеклотекстолита. Сторона ребра отражателя — 11 см, ЭПР =  $101,56 \text{ м}^2$  на частоте 122 ГГц. Выборка фазы по каналам I/Q, снятая за 30 с, представлена на рис. 5. Девияция фазы в градусах на разном расстоянии, снятая по каналам I/Q, показана в таблице. Видно, что при увеличении расстояния девияция возрастает из-за увеличения задержки между излучаемым и отраженным сигналами и накоплением нестабильностей генератора.

Как уже упоминалось, точность по расстоянию при использовании БПФ и полосе ЛЧМ 7300 МГц составляет 20,54 мм. Оценим число фазовых набегов между соседними отсчетами БПФ. Для этого проведем простой эксперимент, по возможности плавно сдвигая уголкового отражателя по линейке на 20,5 мм по направлению к модулю два раза и затем возвращая его на исходные позиции. Результат опыта показан на рис. 6. На нижнем графике показан фазовый набег в градусах по каналам I/Q, полученный с помощью функции Phase\_Unwrap LabView. Видно, что он практически одинаковый в начале и конце эксперимента. На верхней диаграмме белой линией показан максимум амплитудного спектра, а красной



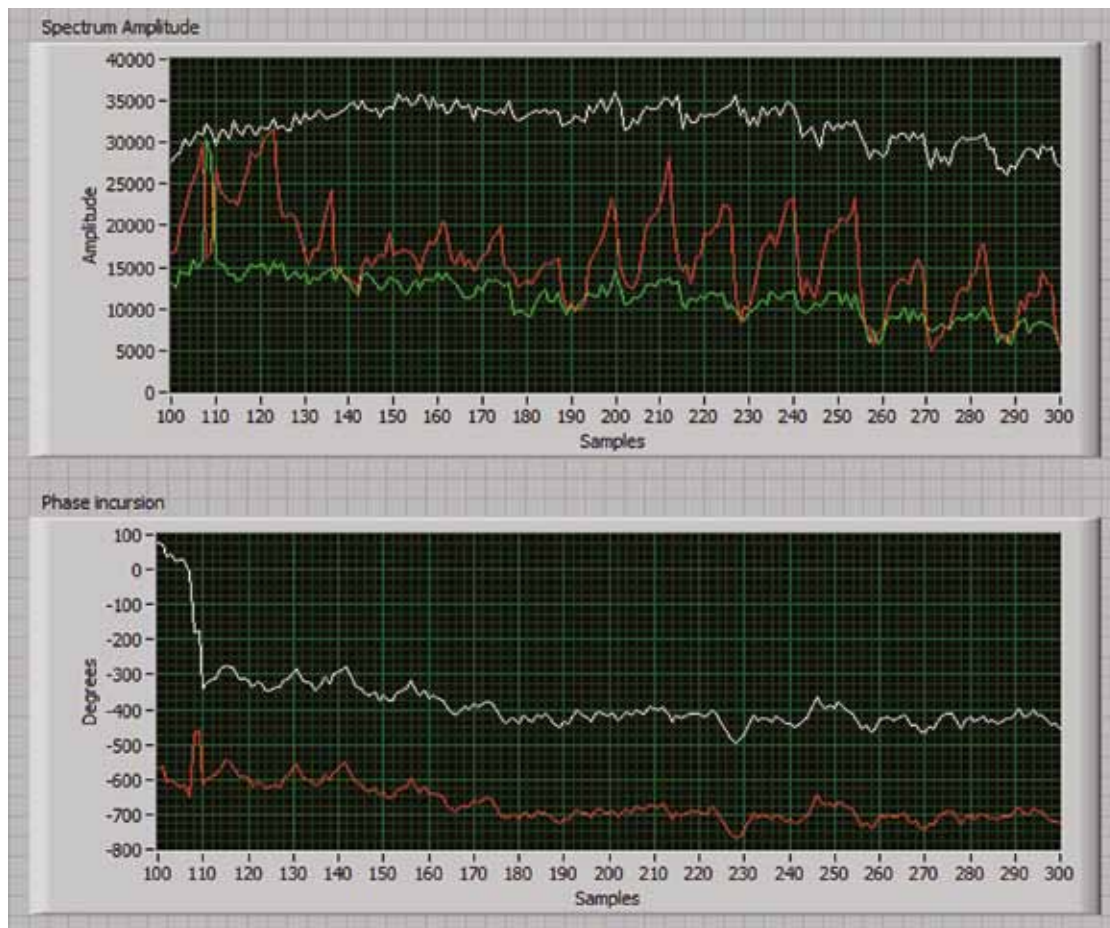
▲ Рис. 6. Амплитудный спектр и набег фазы при смещении уголкового отражателя



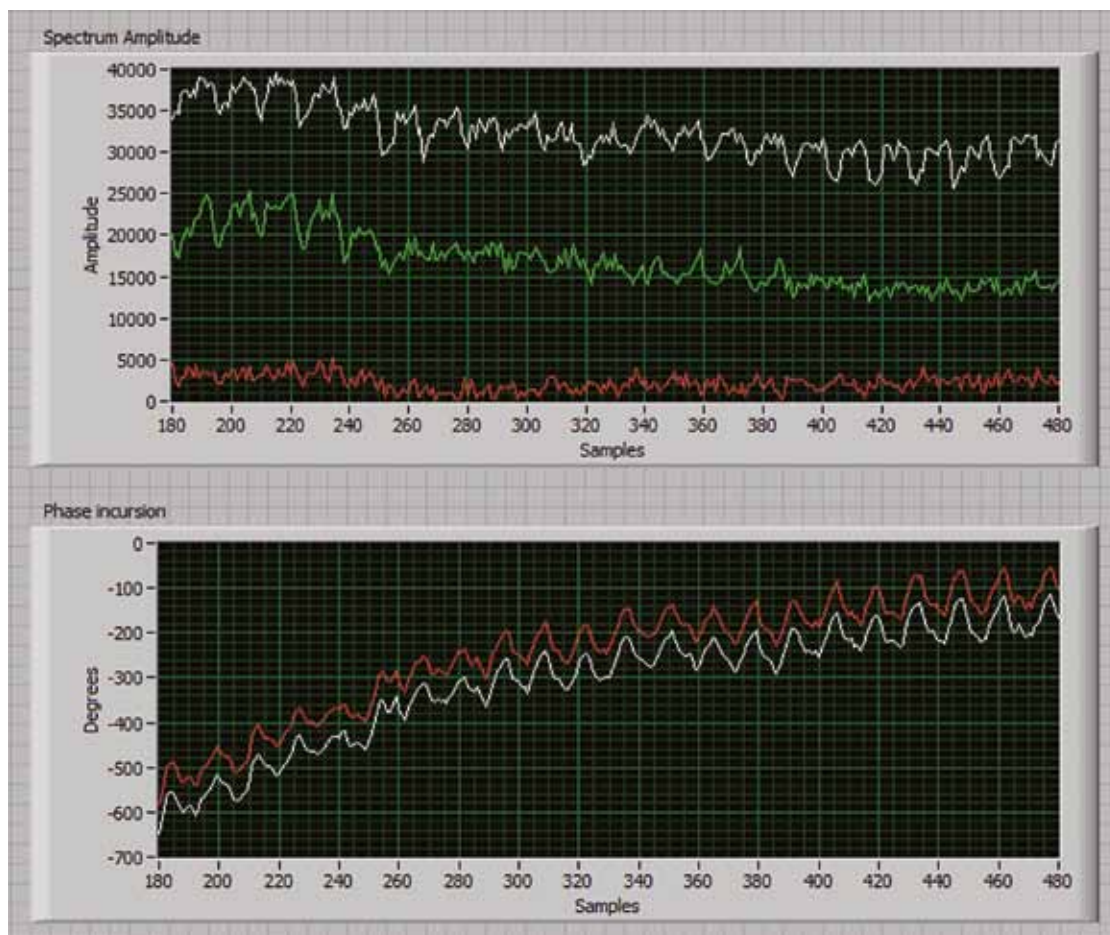
▲ Рис. 7. Набег фазы при двух дыхательных циклах при отражении от области живота

и зеленой линиями — его соседние отсчеты. Их равенство внизу графика означает точное попадание ПЧ в отсчет БПФ, амплитуда которого показана белой линией. Их равенство в средней части графика, которое совпадает с минимумом белой линии, означает, что ПЧ находится точно между двумя соседними отсчетами БПФ.

Фазовый набег при смещении уголкового отражателя на 20,5 мм с учетом погрешности эксперимента находится в диапазоне 4500–5500°, т. е. составляет как минимум 12 вращений фазы по 360° между соседними отсчетами БПФ. Теперь можно пересчитать девиацию фазы из таблицы для расстояния 80 см и погрешность по дальности:  $3,19 \cdot 20 \text{ мм} / (12 \cdot 360^\circ) = 0,015 \text{ мм}$ .



▲ Рис. 8. Амплитудный спектр и набег фазы при отражении от области горла



▲ Рис. 9. Амплитудный спектр и набег фазы при отражении от центра грудины

Таким образом, учет фазового набега позволяет определить погрешность измерения как  $\pm 30$  мкм с вероятностью 95% на расстоянии до одиночного объекта 80 см. Заметим, что для корректного расчета фазового набега изменение фазы от точки к точке не должно превышать  $180^\circ$ , иначе будет накапливаться ошибка. Таким образом, при заданных параметрах скорость движения объекта должна быть меньше  $20 \text{ мм}/(12 \cdot (360/180)/15 \text{ Гц}) = 12,5 \text{ мм/с}$ .

### ИЗМЕРЕНИЕ ДЫХАНИЯ И ПУЛЬСА

Наблюдение за дыханием не представляет собой большой сложности. На рис. 7 показан фазовый набег по каналам I/Q за 40 с при отражении сигнала от живота. Отчетливо видны два вдоха и выдоха, минимумы на графике соответствуют вдоху. Амплитудный спектр не приводится, т. к. он сильно изрезан и неинформативен. Заметим, что красная и белая линии в конце графика довольно-таки существенно расходятся, что говорит о накоплении ошибок в фазовых набеге по каналам I/Q. Ошибку можно сократить, увеличив скорость съема данных и используя более совершенные алгоритмы их обработки. Тем не менее, даже сейчас можно легко измерить такие параметры, как частоту дыхания, время вдоха, выдоха и паузы и их глубину. Так, длительность паузы здесь составляет:  $((345-125)/920) \cdot 60 \text{ с} = 14,34 \text{ с}$ , а интервал между вдохами:  $((380-65)/920) \cdot 60 \text{ с} = 20,54 \text{ с}$ .

Измерение пульса представляет собой более сложную, но, тем не менее, решаемую задачу.

На рис. 8 показан амплитудный спектр и фазовый набег при отражении сигнала от области горла. Интересно, что здесь пульс четко прослеживается лишь в боковой составляющей амплитудного спектра, которая изображена красной линией.

Наилучшие результаты получены при отражении сигнала от центра грудины перпендикулярно ее поверхности при задержке дыхания (рис. 9). Пульс четко прослеживается как на нижней диаграмме по фазовому набегу, так и на верхней по белой линии, которая показывает значение максимума в амплитудном спектре. 21 удар пульса укладывается в 293 временных отсчета за время выборки  $t$ , что определяет частоту:  $21 \text{ удар}/t \cdot (920 \text{ отсчет/мин}/293 \text{ отсчет}/t) = 65,9 \text{ ударов/мин}$ .

Заметим, что при потенциальной скорости съема 100 реализаций/с частоту сердечных сокращений можно измерять при получении достоверных данных лишь о 2–3 ударах пульса.

Мы рассмотрели возможность дистанционного измерения дыхания и пульса с помощью отладочного комплекта SiRad Easy на основе микросхемы TRX\_120\_001. Наилучшие результаты измерения дыхания получены при отражении от живота, пульсовая волна при этом практически не прослеживается.

Измерение пульса значительно сложнее. Для него требуется: точное позиционирование датчика, фиксированное положение тела, его расслабление и задержка дыхания. Наилучшие результаты измерения пульса получены при перпендикулярном падении луча в центр грудины. Установлено, что в ряде случаев пульс лучше отслеживается и в амплитудном спектре, что, по всей видимости, вызвано изменением отражающей способности при кровенаполнении.

Актуальными задачами в этом направлении являются: точное решение задачи позиционирования (возможно, с подстройкой по углу или многолучевым приемом); увеличение дальности и скорости съема данных; выделение пульса на фоне дыхания; применение более сложных алгоритмов обработки данных для получения более достоверных и быстрых результатов.

Для увеличения отражающей способности от живых объектов можно использовать металлическую метку или одежду с частичной металлизацией, что позволит увеличить дальность действия или фиксировать движение более мелких объектов, например сокращение мышц.

Помимо ЛЧМ, 122-ГГц радарные модули SiRad Easy и SiRad Simple можно также использовать в доплеровском режиме или режиме частотной манипуляции. Заметим также, что обе микросхемы компании Silicon Radar TRX\_120\_001 и TRX\_120\_002 выпускаются серийно и потому вполне доступны для самостоятельного применения. —

### ЛИТЕРАТУРА:

1. [www.siliconradar.com](http://www.siliconradar.com).
2. [www.siliconradar.com/datasheets/160721\\_Datenblatt\\_TRX\\_120G.pdf](http://www.siliconradar.com/datasheets/160721_Datenblatt_TRX_120G.pdf).
3. [www.analog.com/en/education/education-library/mixed\\_signal\\_dsp\\_design\\_book.html](http://www.analog.com/en/education/education-library/mixed_signal_dsp_design_book.html).
4. [www.siliconradar.com/datasheets/UserGuide\\_EasyRadar.pdf](http://www.siliconradar.com/datasheets/UserGuide_EasyRadar.pdf).
5. Константин Горбатов. Знакомство с компанией Silicon Radar. Компоненты и технологии. 2017. № 5.
6. <https://realterm.sourceforge.io>.
7. [www.siliconradar.com/datasheets/160627\\_short\\_desc\\_protocol.pdf](http://www.siliconradar.com/datasheets/160627_short_desc_protocol.pdf).