

Радары диапазонов 77 и 24 ГГц для автотранспорта и дорожной инфраструктуры (часть 1)

- [Блог компании Миландр](#),
- Локализация продуктов,
- Схемотехника,
- Производство и разработка электроники,
- Транспорт

Почему именно радары?

Компания «АО ПКС Миландр» знакома хабровчанам в сфере разработки интегральных микросхем. Сейчас номенклатурный ряд микросхем достаточно широкий, но в данном контексте нам интересны именно DSP (ЦОС) процессоры 1967BH028 и 1967BH044, которые имеют систему команд совместимую с процессором ADSP TS201. Принципиальное различие процессоров заключается в том, что 1967BH028 нацелен на работу в составе многопроцессорного вычислительного кластера, а 1967BH044 больше подходит на роль микроконтроллера с мощным вычислительным ядром и богатым набором периферии.

Именно процессоры 1967BH028 стали востребованы в радарной тематике, правда речь идет о радарх «специального» назначения. В качестве примера могу привести блок обработки радиолокационных данных - ВНБО, рисунок 1).



Рисунок 1. Внешний вид ВНБО.

ВНБО предназначен для цифровой обработки радиолокационных сигналов, поступающих от блока приёмопередающих модулей, и передачи результатов на рабочую станцию оператора:

- Тип вычислительного ядра - микросборка «МВМ-03» (4×1967ВН028 + ПЗУ);
- Количество - 52 микросборки «МВМ-03»;
- Вычислительная производительность ~1100 Гфлопс.

Соглашусь, что 1100 Гфлопс сегодня не выглядит как выдающийся результат, но стоит отметить, что речь о «специальном назначении» (со всеми «вытекающими» особенностями: работа при температуре в -60, рядом с источником электромагнитных "помех" в 100 кВт) и о том, что ближайший отечественный аналог, разработанный не так давно на других процессорах, имеет вычислительные возможности почти в три раза ниже.

Как это связано с темой статьи?

Как оказалось, напрямую... В 2018 году ФГУП «НАМИ» пригласило представителей нашей компании для участия в рабочей группе на тему «Компоненты отечественной системы ADAS (Advanced driver-assistance systems)». Основными

участниками этой встречи были ФГУП «НАМИ», ПАО «КАМАЗ», «Группа ГАЗ», «УАЗ». Обсуждались такие вопросы, как «Разработка отечественных автокомпонентов, предназначенных для решения задачи ADAS (камеры, блоки управления, радары)», «Подготовка необходимой нормативной базы», «Наиболее востребованные функции ADAS по мнению отечественных автомобилепроизводителей», «Планы и предварительные сроки введения соответствующих уточнений в новый технологический регламент» и многие другие, в общем, серьёзные вопросы, которые могут повлиять на нашу повседневную жизнь. Больше всего это было похоже на начало нового масштабного проекта, каким ранее был «ЭРА-ГЛОНАСС» (если вспомнить, то в «Эру» тоже многие не

верили и сроки регулярно отодвигались, но сегодня мы все видим насколько она была неотвратима). После этого было много чисто технических рабочих групп на территории ФГУП «НАМИ» и участие в группах по регулированию нормативной базы в составе «Национальной технологической инициативы Автонет». Были споры, дебаты, - острая, но интересная конкурентная борьба заинтересованных лиц.

Результатом функционирования рабочих групп стала разработка целой серии новых стандартов (в плане разработки числились более 180 проектов), регламентирующих различные сферы автомобильной отрасли: от электрифицированного (например, элементы инфраструктуры: зарядные станции, методы подключения, протоколы взаимодействия и т.д.) до автономного транспорта (см. далее). Для примера приведу несколько свежих стандартов по теме ADAS:

- ГОСТ Р 58835-2020 Автомобильные транспортные средства. Бортовые системы помощи водителю. Радарные подсистемы. Общие технические требования и методы испытаний. (Дата введения 2021-04-30)
- ГОСТ Р 58834-2020 Автомобильные транспортные средства. Бортовые системы помощи водителю. Общие технические требования к компонентам и методы испытаний. (Дата введения 2021-04-30)
- ГОСТ Р 58838-2020. Автомобильные транспортные средства. Бортовые системы помощи водителю. Системы непрямого обзора. Общие технические требования и методы испытаний (Дата введения 2021-04-30)

Таким образом, Миландр, с одной стороны, имел опыт разработки ~~военных~~ ~~локаторов~~ вычислительной техники для обработки радиолокационных данных, с другой – опыт разработки отечественных DSP процессоров, а также давно сотрудничал с кафедрой «Информационных радиосистем» Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева (одного из основных профильных

ВУЗов по радиолокации). Другими словами, многое сложилось удачно. А ещё мне как инженеру кажется важным, что к началу такого сложного проекта в лабораториях Миландра имелось всё необходимое ~~безумно-дорогое~~ измерительное оборудование.

Ближе к теме!

Рассмотрим принцип работы FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) радара, обобщенная структура которого показана на рисунке 2. Передатчик радара излучает непрерывный ВЧ сигнал через топологически сфазированную антенную решетку (АР), частота которого изменяется в заданном диапазоне по заранее определенному линейному закону, при этом амплитуда частотно-модулированного сигнала остается практически неизменной. Излучаемые радаром электромагнитные сигналы, отражаясь от объектов, находящихся в зоне обнаружения, поступают через приёмную АР на модуль приема-передатчиков, где, смешиваясь с передаваемым сигналом, образуют разностный сигнал на промежуточной частоте. Частота промежуточного сигнала f_{if} зависит от расстояния f_R и относительной скорости f_D обнаруженного объекта.

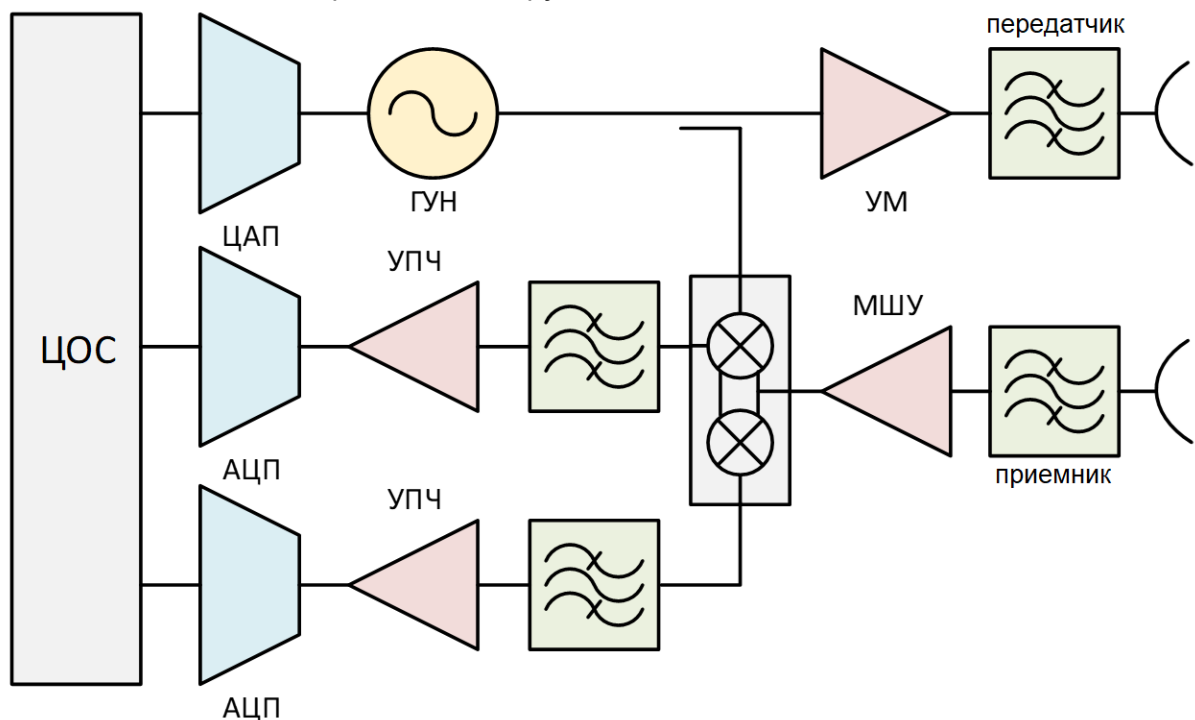


Рисунок 2. Обобщенная структурная схема.

Рассмотрим идеальный случай, когда цель одна, и движется медленно (рисунок 3). Графики показывают характер изменения частоты передаваемого (красный) и принимаемого (зеленый) СВЧ сигналов во времени и причину формирования промежуточной частоты $f_{if}(T - \text{период зондирования, разностная частота показана без знака})$.

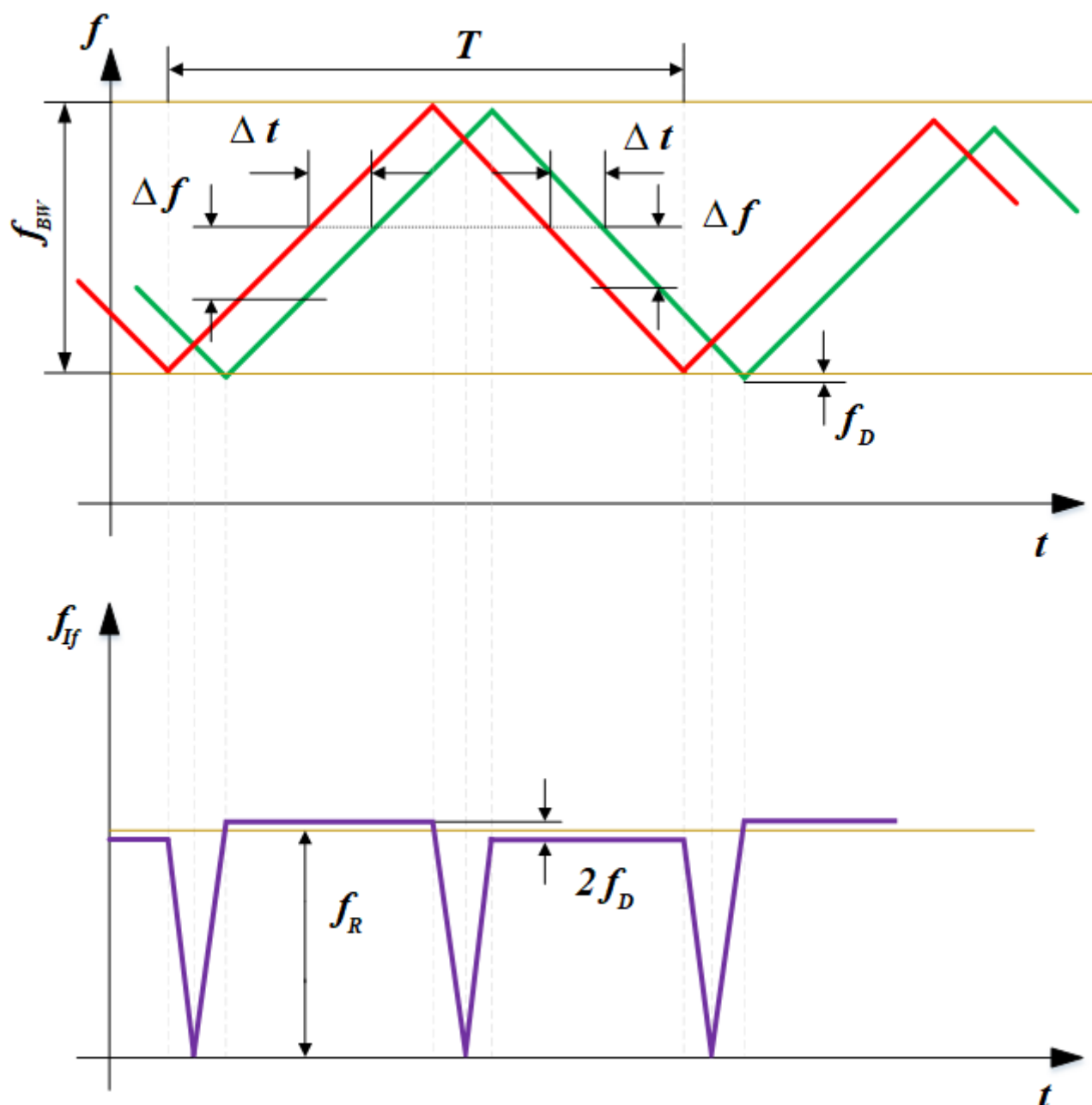


Рисунок 3. Принцип работы FMCW радара при частотно-модулированном излучаемом сигнале.

Промежуточная частота f_{if} складывается из двух компонент: доплеровского сдвига частоты, зависящего от скорости объекта

и разностной частоты, вызванной временной задержкой на распространение зондирующего сигнала "туда" и "обратно"

Промежуточная частота f_{if} , формируется согласно уравнению

При использовании нашего модуля приемопередатчика M-LC6 (описание есть на сайте) в условиях безэховой камеры и не быстрого (500 Гц) модулирующего «пилообразного» сигнала отражение от углового отражателя выглядит следующим образом (рисунки 4 и 5):

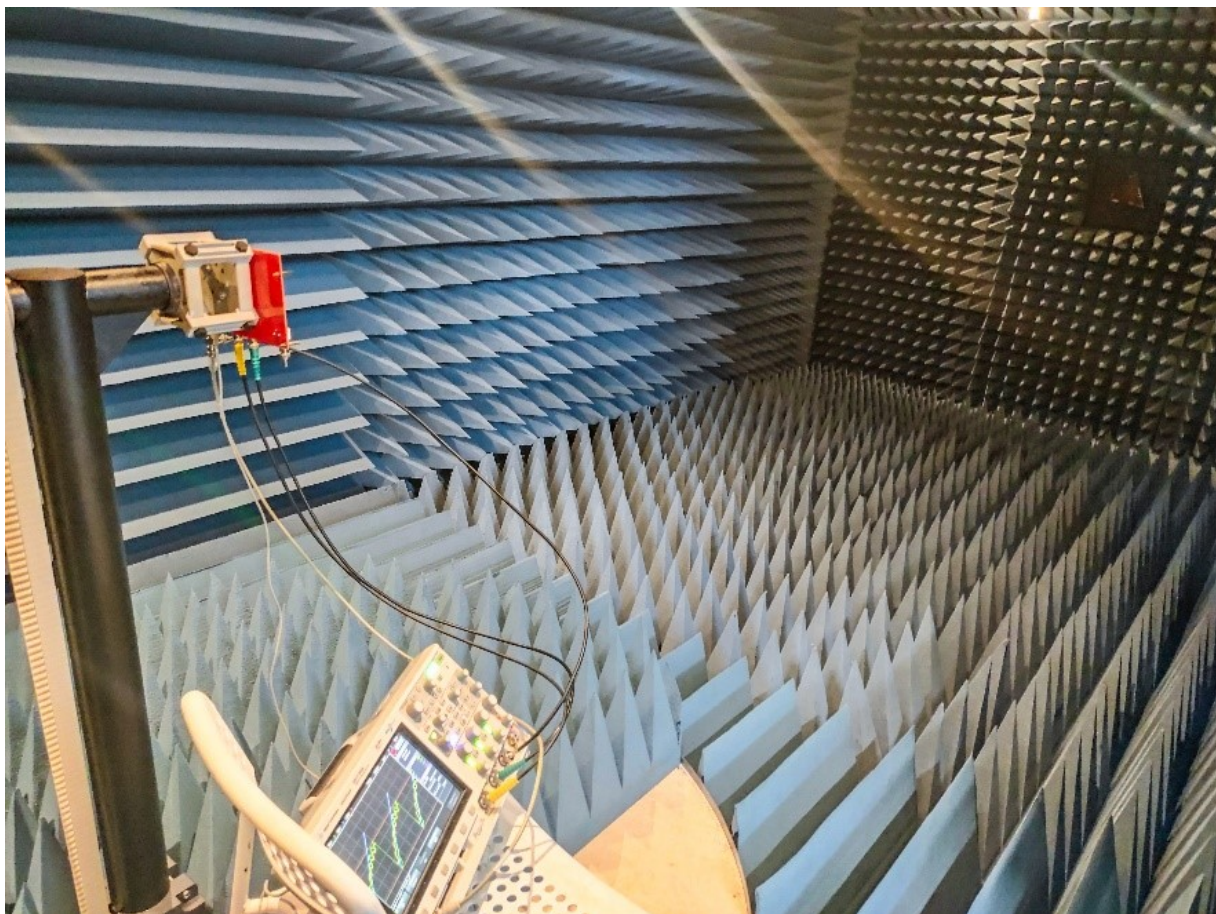


Рисунок 4. Фотография условий эксперимента.

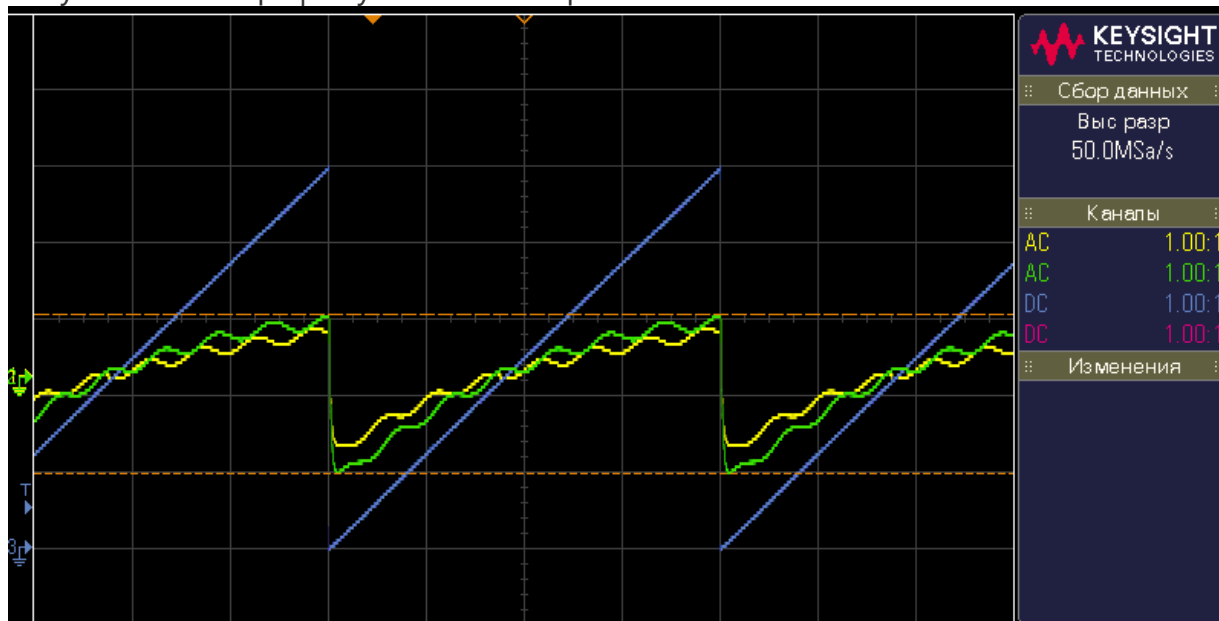


Рисунок 5. Модулирующий сигнал (синий), квадратурный (желтый) и синфазный (зеленый) сигналы ПЧ.

Результат расчета FFT по квадратурной компоненте после цифрового фильтра верхних частот и удаления паразитной модуляции (вызванной «проникновением» сигнала передатчика в приемник внутри СВЧ микросхемы) даёт спектр, показанный на рисунке 6.

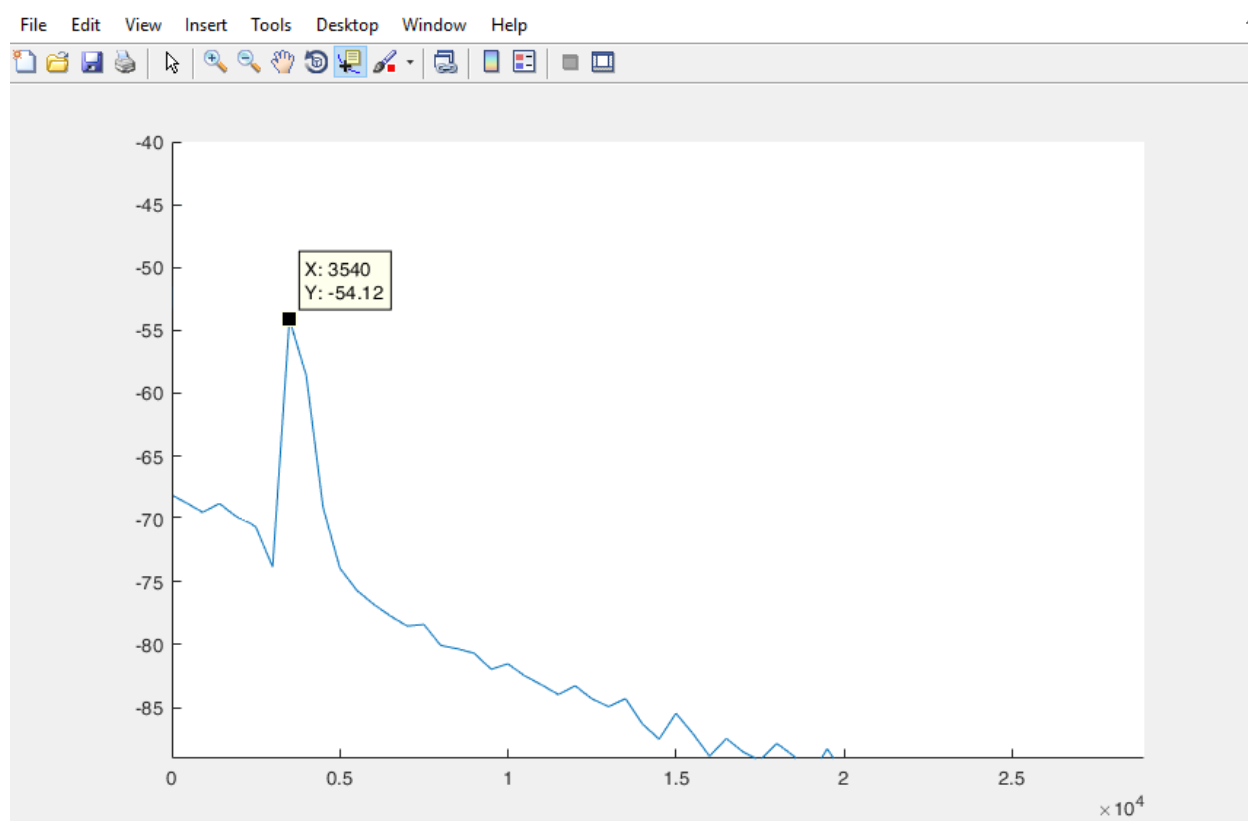


Рисунок 6. Результат расчета FFT.

Рассчитаем разностную частоту для данного случая (понимая, что $f_D = 0$):

Matlab и осциллограф, совмещенный с генератором от Keysight, - это, конечно, хорошо и правильно, но в реальности для коммерческой компании – это неинтересно. Необходимо, чтобы всё было в формате законченного изделия, имеющего реальное коммерческое применение.

Нет ничего проще.. часы ругани "мозговых штурмов", недели расчетов, месяцы испытаний и год работы - в трех рисунках 7, 8, 9.

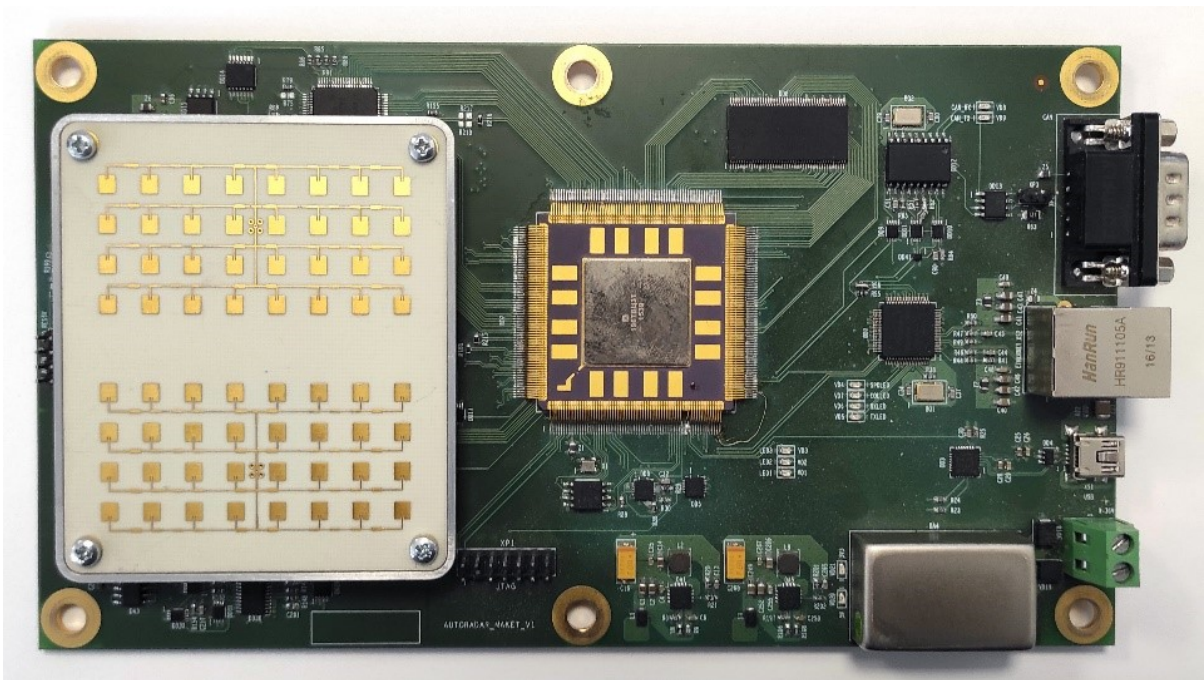


Рисунок 7. Фотография прототипа.



Рисунок 8. Фотография макета.

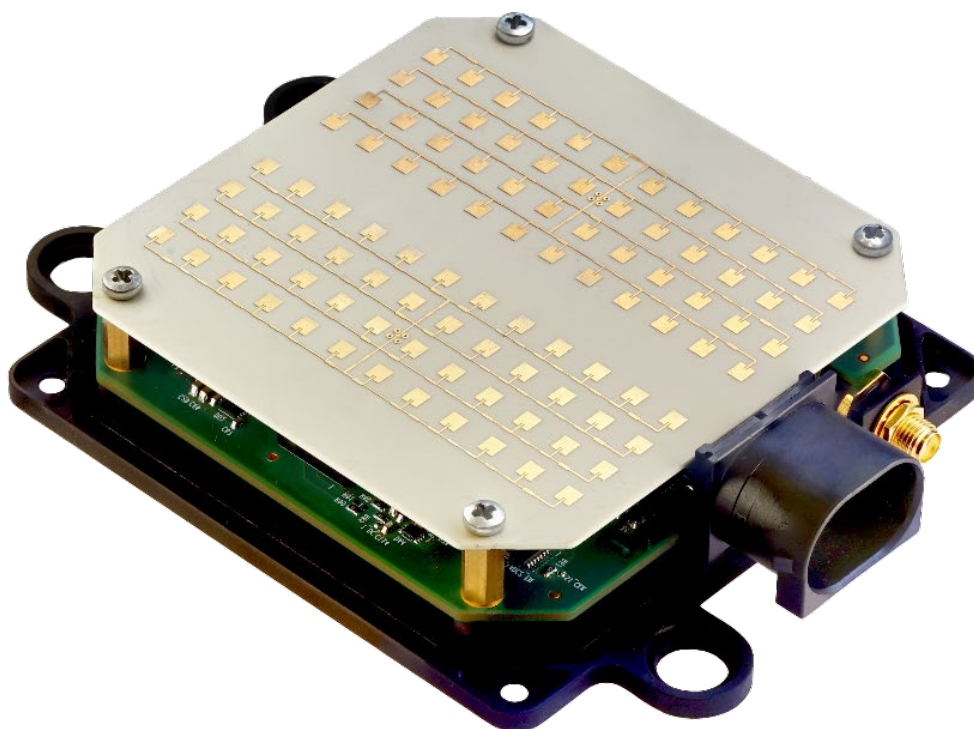


Рисунок 9. Фотография опытного образца «однолучевого радара».

«Однолучевой радар» состоит из модулей приемопередатчика и вычислителя с сигнальным процессором. Приёмопередатчик представляет собой компактный модуль, включающий АР, реализованную в виде отдельных передающей и приемной частей, выполненных симметрично. Каждая часть состоит из отдельных патч-антенн, сориентированных между собой таким образом, чтобы была сформирована желаемая диаграмма направленности (ДН), и минимизировано взаимное влияние приёмника и передатчика. Модуль цифрового вычислителя разработан на основе 32-разрядного высокопроизводительного процессора цифровой обработки сигналов 1967ВН044 (тактовая частота до 230 МГц). Рассмотрим подробнее структурную схему радара (рисунок 10).

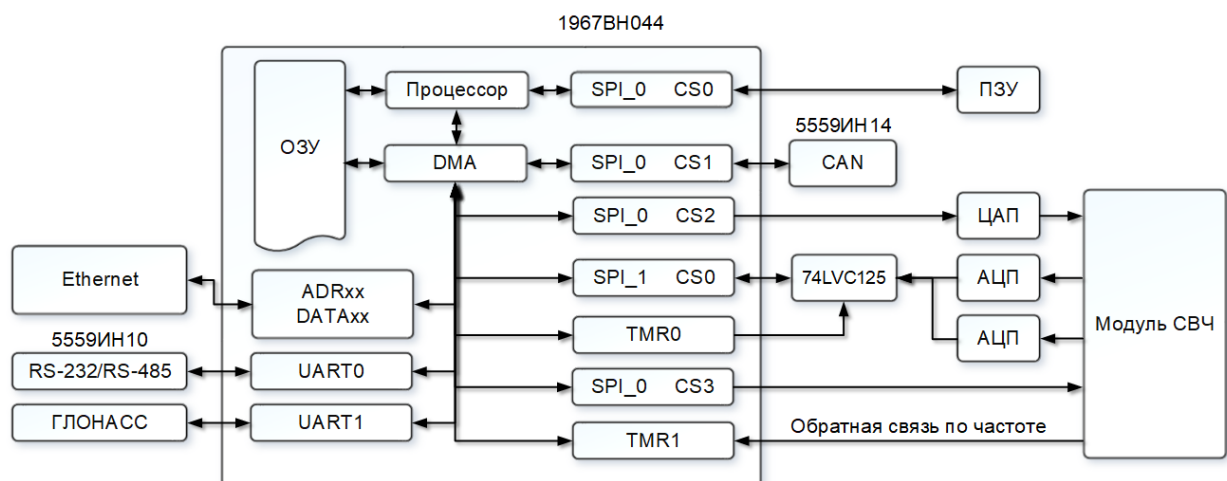
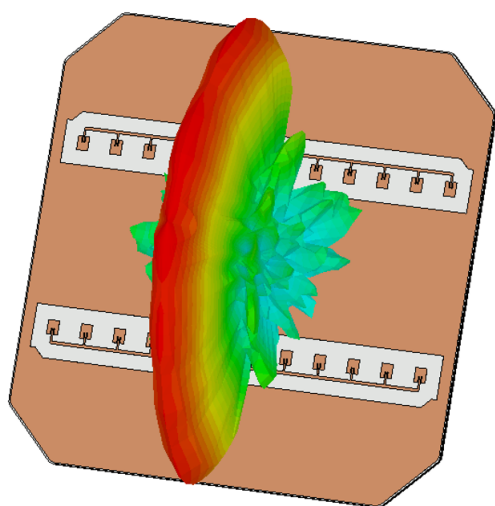


Рисунок 10. Структурная схема опытного образца «однолучевого радара»

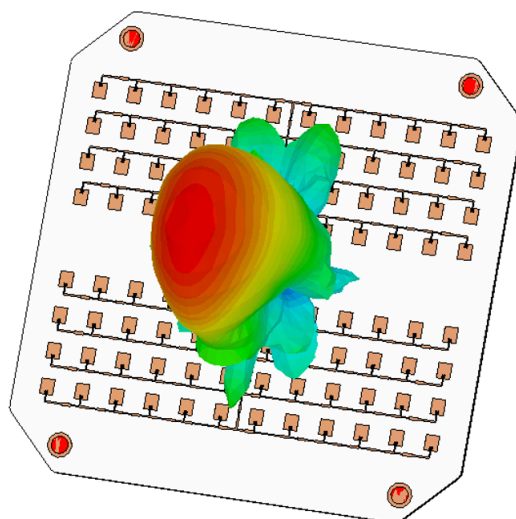
Всё просто, а в гражданских изделиях иначе и нельзя - должно быть дешево и надежно. Центром радара является 1967BH044 немного переделанный под данную задачу... Загружать ПО процессор умеет по SPI, соответственно, в качестве ПЗУ подходит почти любая «флэшка».

ЦАП и АЦП выбираются по частоте, цене и возможности когерентного захвата данных. Сейчас реализована простая схема, почти не загружающая процессорное время, – в ОЗУ лежит заранее сформированный фрагмент «пилы»; цепочка DMA выдвигает данные в SPI0 и в нужный момент перезапускает фрагмент этой пилы, запуская таймер TMR0. TMR0 запускает другую цепочку DMA, которая собирает данные с SPI1, выводы nCS двух АЦП объединены, выводы SDO, CLK заведены на простенький буфер, TMR0 также управляет stroбами nOE буфера, а DMA собирает данные последовательно сначала с одного АЦП, а затем с другого, даже не подозревая, что это не один АЦП. Процессор загружается разного рода «фильтрацией» и расчетом FFT. Физический уровень CAN обеспечивает микросхема 5559IH14, а логический – SPI CAN-контроллер. Ethernet также выполнен на Ethernet-контроллере. Решение по CAN и Ethernet сейчас переносится на наш 1986BE1QI, там уже есть CAN и Ethernet. Микросхема ГЛОНАСС используется не обычная, а «Навигационный приемник ГЛОНАСС/GPS/SBAS/GALILEO — ПРО-04, ИЛТА.464346.001» НИИ МА ПРОГРЕСС. Работает нормально, подключается по UART, свои задачи явно выполняет. Физический уровень RS-485 обеспечивает микросхема 5559IH10. Таким образом видно, что сегодня вполне реально создать коммерческий продукт с очень высокой степенью «отечественности» локализации по ЭКБ.

Удобство такой модульной платформы очевидно. Меняем СВЧ приёмопередатчик (рисунок 11) – получаем другое изделие, а FFT «крутится» на процессоре.



ДН по азимуту	$\pm 4^\circ$
ДН по углу места	$\pm 35^\circ$



ДН по азимуту	$\pm 7^\circ$
ДН по углу места	$\pm 12^\circ$

Рисунок 11. Пример характеристик двух СВЧ модулей в одном габарите.

Разработкой СВЧ мы тоже занимаемся сами, но тут стоит отметить, что разработка - это не просто расчет АР нужной формы. Это долгий процесс «от идеи» и до «серийной сборки», ~~расхлебывая~~ решая все проблемы на своём пути. Например, есть нормы ГКРЧ (РЕШЕНИЕ от 7 мая 2007 года N 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия»), по которым разрешённым диапазоном в России считается 24,05 – 24,25 ГГц. Это значит, что использовать мы можем ЛЧМ максимум 200 МГц *(а аппаратно можем - до 1500 МГц... Жаль...)*, и, применяя в качестве основного математического аппарата FFT, у нас будет следующее ограничение:

Другими словами, если забыть про всё, что реально расширяет нам каждый бин FFT (например, наложение оконной функции), ЛЧМ в 200 МГц обеспечивает нам разрешающую способность по дальности в 75 см. Но 200 МГц должны быть стабильными, иначе будет нарушение ГКРЧ. А так как мы должны использовать максимально ~~дешевые~~ доступные СВЧ микросхемы, ожидаемо, что с термостабилизацией у них не очень. Можно и нужно вносить аналоговую термокомпенсацию *(например вводя термисторы в схему управления ГУН)*. Таких СВЧ приёмопередатчиков мы собрали уже несколько тысяч и можем поделиться обобщенной статистикой (рисунок 12).

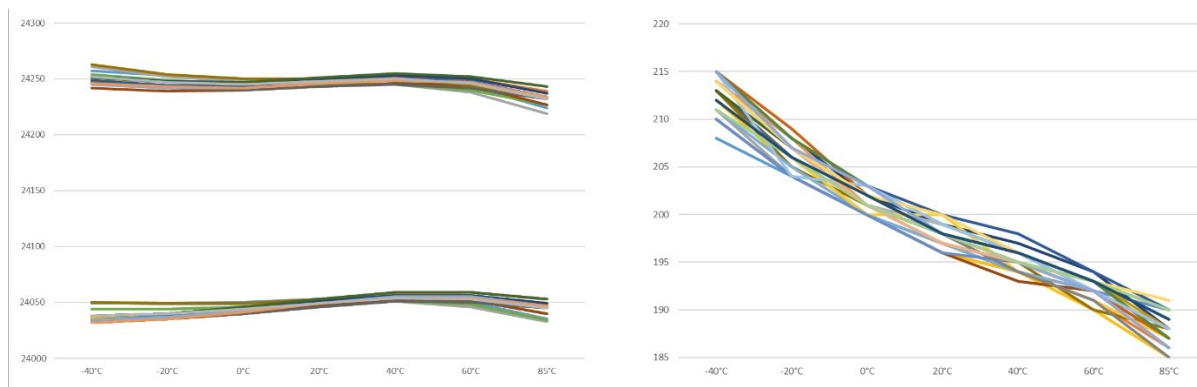


Рисунок 12. Пример характеристик частотно-температурных зависимостей (слева – зависимость абсолютного значения частоты в МГц от температуры, справа – зависимость полосы ЛЧМ сигнала от температуры), при подаче модулирующего сигнала лабораторным генератором.

Видно, что термокомпенсация получилась неплохой, максимальный разброс ± 15 МГц и в крайних значениях температуры (минус 40 плюс 85 градусов). Если считать грубо, то это 30 МГц на 125 градусов или 0,24 МГц на градус (основные импортные аналоги обеспечивают 1 МГц на градус). Но ГКРЧ нарушается, значит, нужна дополнительная стабилизация. На модуле СВЧ для этой цели предусмотрен сигнал делителя частоты (рисунок 10); сигнал делителя - низкочастотный, порядка 24 кГц – заводится на вход таймера TMR1. TMR1 записывает в память текущее значение счетчика «тиков» процессора, затем TMR1 отсчитывает до 1000 и снова записывает значение счетчика «тиков» процессора. Сравнивая эти значения, можно достаточно точно получить значение делителя частоты.

Хорошо, частоту СВЧ сигнала мы теперь знаем, нужно её скорректировать с помощью ЦАП, соответственно, точность подстройки частоты зависит от разрядности и качества ЦАП. Мы получили точность подстройки частоты СВЧ сигнала не хуже 240 кГц, что соответствует $\pm 1 \cdot 10^{-3}\%$ от частоты 24,15 ГГц. Процесс подстройки представлен на рисунке 13.

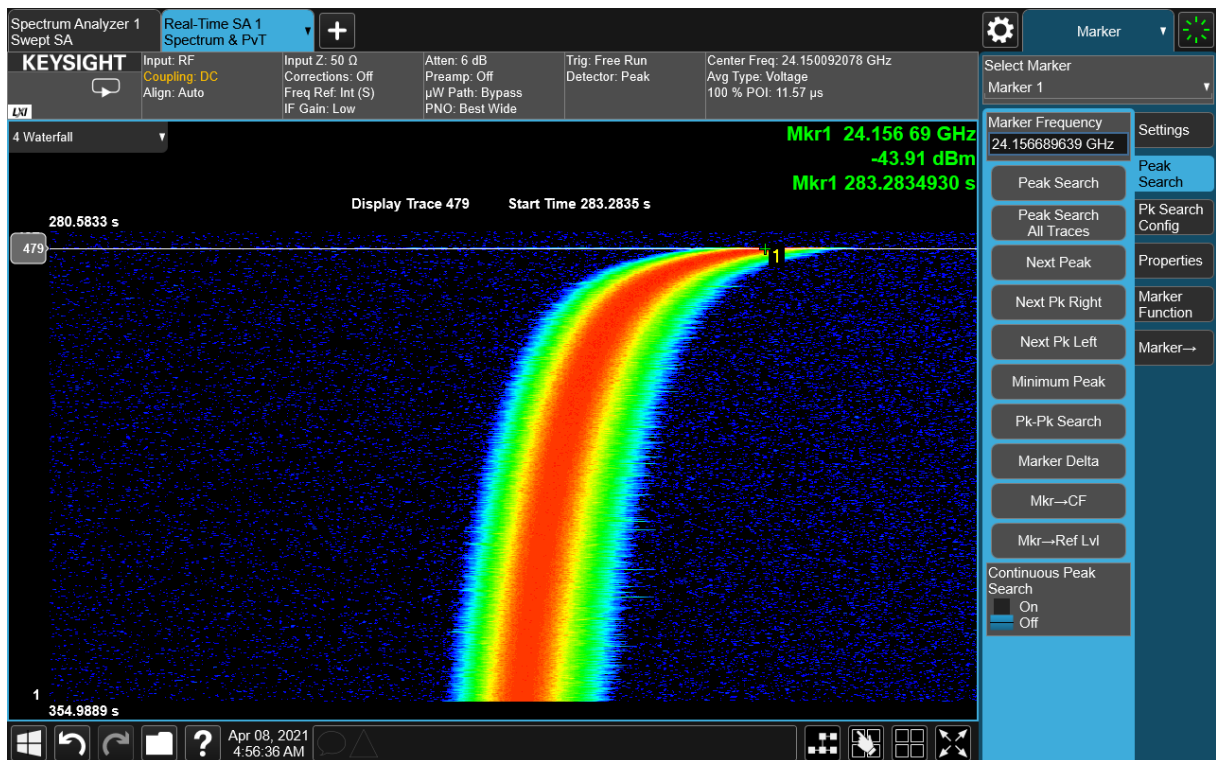


Рисунок 13. Пример частотно-временной зависимости при включении радара. Другой вопрос - изменяется ли диаграмма направленности при использовании крышки из радиопрозрачного материала? К сожалению, крышка почти всегда ведет себя как сильная неоднородность, но при правильном подборе параметров (материал, толщина, самое важное расстояние от AP), в целом, всё будет терпимо. Наибольшие трудности возникают, когда необходима широкая диаграмма, так как увеличивается число возможных переотражений и даже если всё сделано правильно, крышка выступает в качестве диэлектрической линзы и немного обужает диаграмму.

Приведу пример измерений для немного другого радара с использованием следующих крышек: напечатанной на 3D принтере со 100% заполнением (красный), такой же, но отлитой из "типового" обычного пластика Vg280 (голубой), отлитой из "типового" пластика, но на скорректированном расстоянии от AP (зеленый) (рисунок 14).

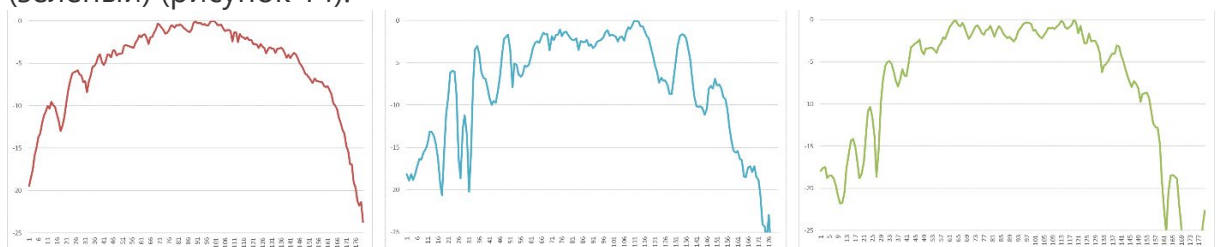


Рисунок 14. Измерение диаграммы направленности.

В общем, нюансов множество, но со всеми можно справиться, если много ~~страдать~~ читать и работать... Зато и результаты есть! Рассмотрим подробнее приборы, разработанные на основе «Однолучевого радара».

Радар «Поток-1», ТСКЯ.466369.007, является радиолокационным детектором транспортных средств (ТС) и предназначен для автоматизированного учета интенсивности дорожного движения. Детектор определяет следующие основные параметры: количество обнаруженных ТС, средняя скорость, загруженность, количество полос, классификация обнаруженных ТС; а для каждого из обнаруженных ТС – скорость, длину, класс, номер полосы движения.

Наименование параметра, единица величины	Значение
Диапазон напряжений питания постоянного тока, В	От 9 до 32
Потребляемая мощность изделия по цепям питания при напряжении питания 12 В, Вт, не более	3
Диапазон изменения рабочей частоты, ГГц	От 24,05 до 24,25
Максимальная мощность излучаемого сигнала, мВт, не более	100
Угол обзора изделия по горизонтали, не более	16°
Угол обзора изделия по вертикали, не менее	60°
Диапазон измеряемых скоростей, км/ч	От 5 до 160
Число одновременно анализируемых полос, не более	12
Анализируемая дальность, м	От 2 до 60
Рабочая температура среды, °С	От – 40 до +75
Габаритные размеры, мм, не более	140×120×35
Масса, кг, не более	0,3
Возможность оснащения модулем отечественного ГЛОНАСС/GPS приемника	Опционально
Возможность оснащения интерфейсами Ethernet, CAN, RS-485, RS-232	Опционально

Детектор располагается возле контролируемого участка дорожного полотна на высоте 4-6 метров в зависимости от числа полос и необходимой максимальной

дальности детектирования. В азимутальной (горизонтальной) плоскости детектор направляется ортогонально дороге, в угломестной плоскости, со смещением в 15-35 градусов (с наклоном в сторону дорожного полотна, рисунок 15).



Рисунок 15. Фотография установки радара «Поток-1» на объекте эксплуатации.

Радар «Скорость-1», ТСКЯ.466369.006, является радиолокационным измерителем скорости движения и предназначен для обнаружения движущихся ТС, детектирования их скорости и направления движения. Измеритель может определять скорость целей с учетом направления их движения (только встречные, только попутные, оба направления), выделять скорости самой быстрой цели из группы и цели с наибольшей амплитудой принятого сигнала.

Наименование параметра, единица величины	Значение
Диапазон напряжений питания постоянного тока, В	От 9 до 32
Потребляемая мощность изделия по цепям питания при напряжении питания 12 В, Вт, не более	3
Диапазон рабочей частоты, ГГц	От 24,05 до 24,25
Максимальная мощность передающего устройства, мВт, не более	100
Угол обзора изделия по горизонтали, не более	16°
Угол обзора изделия по вертикали, не более	26°
Диапазон измеряемых скоростей, км/ч	От 10 до 320
Допускаемый предел среднеквадратичной ошибки измерения скорости, км/ч, не более	±1
Дискретность выдаваемой измерителем информации, км/ч, не более	0,5
Дальность измерения скорости транспортного средства, м	От 10 до 180
Рабочая температура среды, °С	От - 40 до +75
Габаритные размеры, мм, не более	140×120×35
Масса, кг, не более	0,3
Возможность оснащения модулем отечественного ГЛОНАСС/GPS приемника	Опционально
Возможность оснащения интерфейсами Ethernet, CAN, RS-485, RS-232	Опционально

Измеритель (рисунок 16) может быть использован как самостоятельный прибор, так и встраиваться в готовые решения заказчика. В настоящее время востребованы следующие применения: табло информирования о превышении скорости на опасном участке дороги, системы контроля скорости движения в складских помещениях и частных территориях.



Рисунок 16. Применение радара скорость для информирования о опасном участке дороги.

Радары «Поток-1» и «Скорость-1» соответствуют требованиям ГОСТ Р 50856-96, ГОСТ 33991 2016, ГОСТ Р 50607-2012 с уточнениями, изложенными в технических условиях, являются конструктивно законченными, самостоятельными, изделиями и имеют класс защиты IP67 по ГОСТ 14254-2015.

Заключение.

Работа над радаром не останавливается думаю в следующей части статьи можно подробнее рассказать про именно автомобильные радары на 24 ГГц и 77 ГГц, сейчас просто покажу их внешний вид, рисунок 17.

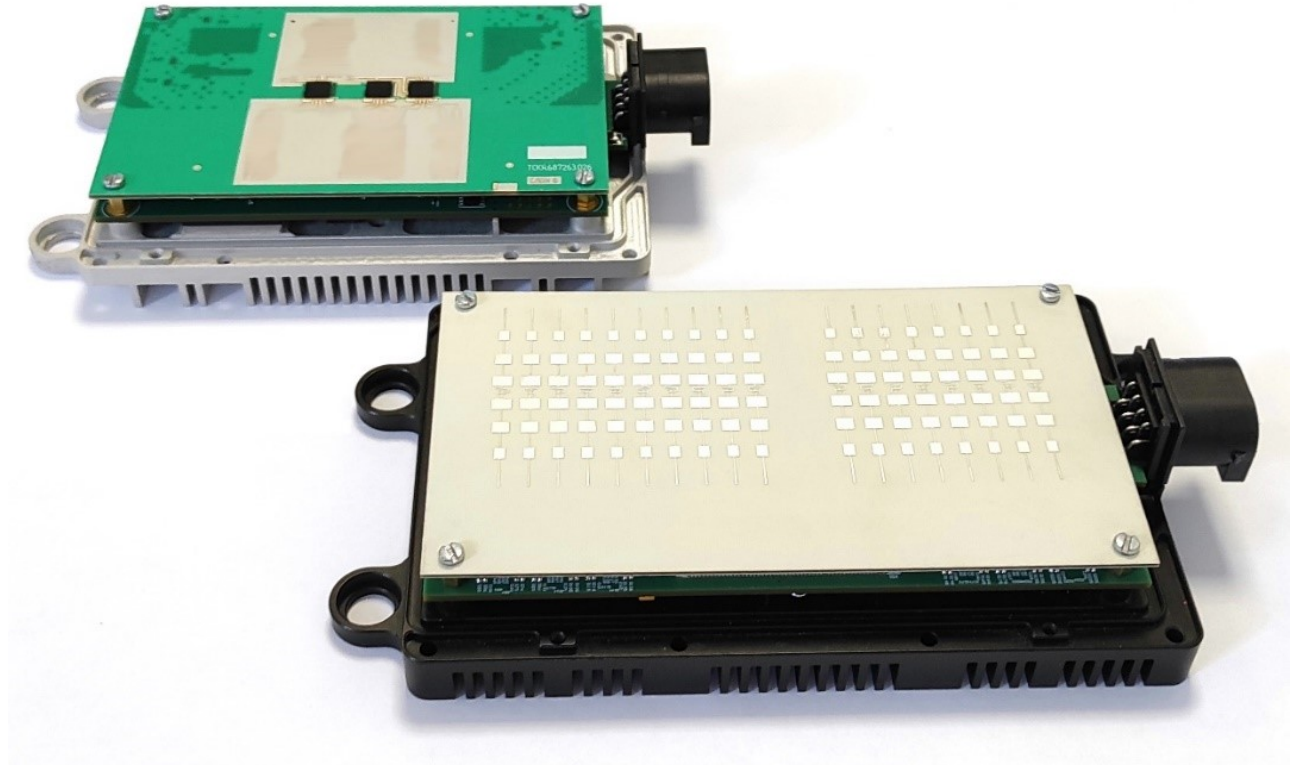


Рисунок 17. Внешний вид автомобильных радаров «МАРС–2А1» (правее, ниже) и «Обзор-77-2» (левее, выше).

Спасибо, что дочитали..

Теги:

- [радар](#)
- [adas](#)
- [дорожный трафик](#)
- [безопасность](#)
- [цос \(dsp\)](#)
- [электроника для начинающих](#)
- [инженерные системы](#)
- [локализация продуктов](#)

Хабы:

- [Блог компании Миландр](#)
- [Локализация продуктов](#)
- [Схемотехника](#)
- [Производство и разработка электроники](#)
- [Транспорт](#)