

Радары для автотранспорта и дорожной инфраструктуры с применением процессоров АО «ПКК Миландр»

М. Бирюков¹

УДК 621.3 | ВАК 05.27.01

Компания АО «ПКК Миландр» сегодня предлагает достаточно широкий номенклатурный ряд интегральных микросхем. Среди них 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. Данные процессоры стали востребованы в радарах. О применении процессоров АО «ПКК Миландр» в автомобильных радарах рассказывается в статье.

В качестве одного из примеров применения процессоров 1967BH028 в радарах можно привести блок обработки радиолокационных данных – ВНБО (рис. 1). ВНБО предназначен для цифровой обработки радиолокационных сигналов, поступающих от блока приемопередающих модулей, и передачи результатов на рабочую станцию оператора. Основные характеристики устройства:

- тип вычислительного ядра – микросборка «МВМ-03» (4 × 1967BH028 + ПЗУ);
- количество – 52 микросборки «МВМ-03»;
- вычислительная производительность ~1100 Гфлопс.

1100 Гфлопс сегодня может показаться не самым выдающимся результатом, но стоит отметить, что речь об устройствах «специального назначения» (со всеми «вытекающими» особенностями: работа при температуре в –60 °С, рядом с источником электромагнитных «помех» примерно в 100 кВт). Ближайший отечественный аналог, разработанный не так давно на других процессорах, имеет вычислительные возможности почти в три раза ниже.

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 др. После этого представители АО «ПКК Миландр» принимали участие в работе многих чисто технических рабочих групп на территории ФГУП «НАМИ», а также групп по регулированию нормативной базы в составе «Национальной технологической инициативы Автонет».

Результатом функционирования рабочих групп стала разработка целой серии новых стандартов,



Рис. 1. Внешний вид ВНБО

¹ АО «ПКК Миландр», начальник ОРРП ЦП РЭА, biryukov.m@milandr.ru.

регламентирующих различные сферы автомобильной отрасли: от электрифицированного (например, элементы инфраструктуры: зарядные станции, методы подключения, протоколы взаимодействия и др.) до автономного транспорта. Вот несколько примеров 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, компания «Миландр», с одной стороны, имела опыт разработки вычислительной техники для обработки радиолокационных данных, с другой – опыт разработки отечественных DSP-процессоров, а также давно сотрудничала с кафедрой «Информационные радиосистемы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева (одного из основных профильных вузов по радиолокации). И, что также важно, в лабораториях АО «ПКК Миландр» имелось всё необходимое для решения подобных задач измерительное оборудование.

Накопленные заделы были использованы для разработки ряда автомобильных радаров.

Рассмотрим принцип работы FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) радара, обобщенная структура которого показана на рис. 2. Передатчик радара излучает непрерывный ВЧ-сигнал через фазированную

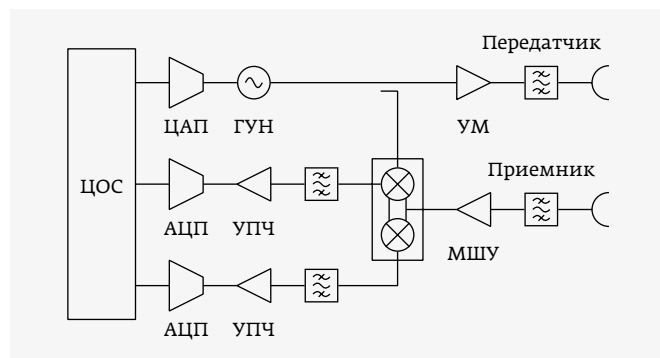


Рис. 2. Обобщенная структурная схема. УПЧ – усилитель промежуточной частоты, МШУ – малошумящий усилитель, УМ – усилитель мощности, ГУН – генератор, управляемый напряжением

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 приемную АР на модуль приемо-передатчиков, где, смешиваясь с передаваемым сигналом, образуют разностный сигнал на промежуточной частоте. Частота промежуточного сигнала f_{if} зависит от расстояния R до обнаруженного объекта и его относительной скорости V .

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

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

$$f_D = \frac{2V}{\lambda}$$

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

$$f_R = \frac{2R}{c} \cdot \frac{f_{BW}}{T/2}.$$

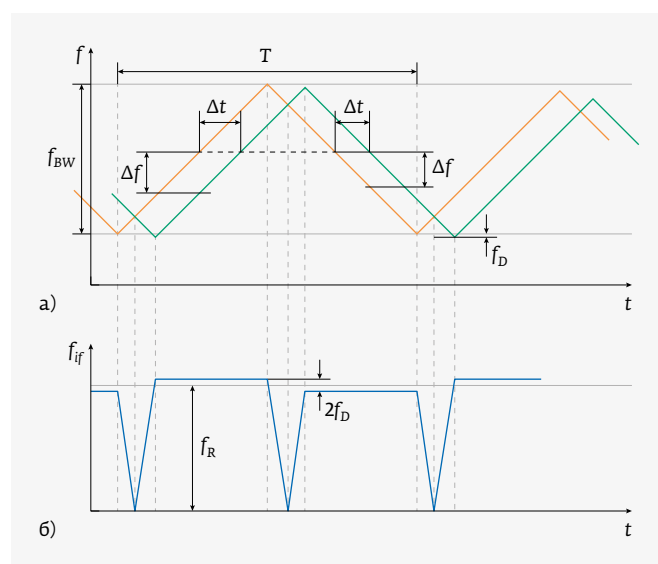


Рис. 3. Принцип работы FMCW-радар при частотно-модулированном излучаемом сигнале: а – изменения частоты передаваемого (красный) и принимаемого (зеленый) сигналов; б – зависимость от времени промежуточной частоты

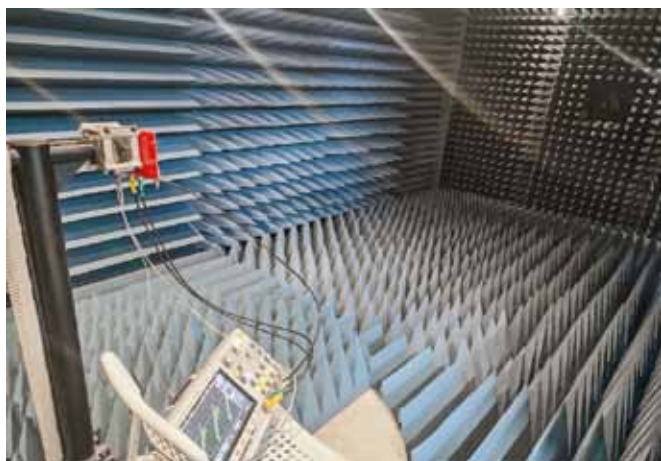


Рис. 4. Фотография условий эксперимента

Промежуточная частота f_{if} формируется согласно уравнению

$$f_{if} = \pm \frac{2V}{\lambda} + \frac{2R}{c} \cdot \frac{f_{BW}}{T/2}.$$

При использовании нашего модуля приемопередатчика М-LC6 (его описание можно найти на сайте АО «ПКС Миландр» – www.milandr.ru) в условиях безэховой камеры и не быстрого (500 Гц) модулирующего «пилообразного» сигнала отражение от углового отражателя выглядит, как показано на рис. 4 и 5.

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

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

$$f_{if} = \frac{f_{BW}}{T} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{c} \right) = \left(\frac{200 \text{ МГц}}{500 \text{ Гц}} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot 5,4 \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \right) = 3600 \text{ Гц}.$$

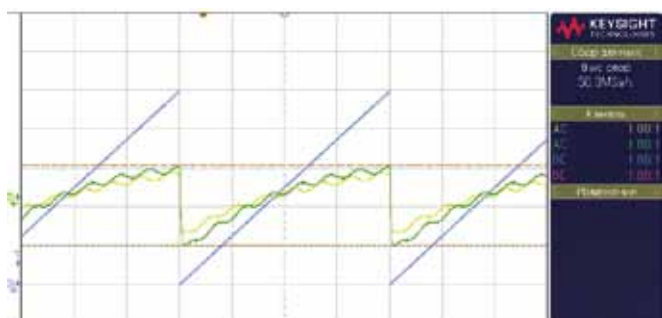


Рис. 5. Модулирующий (синий), квадратурный (желтый) и синфазный (зеленый) сигналы ПЧ

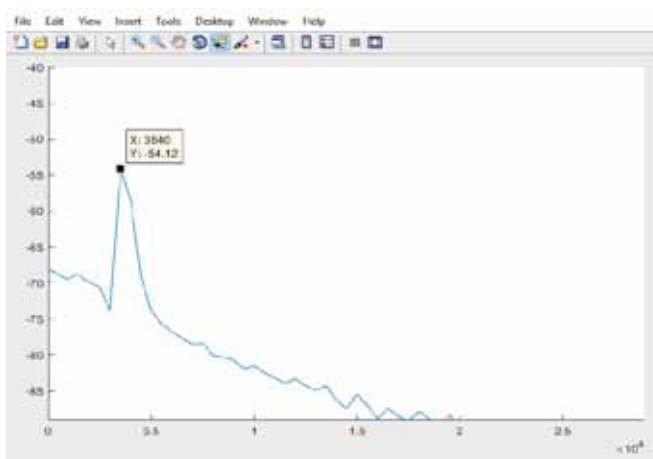


Рис. 6. Результат расчета FFT

На основе проведенных исследований в АО «ПКС Миландр» было разработано законченное изделие: «однолучевой радар» (рис. 7, 8, 9). Он состоит из модулей приемопередатчика и вычислителя с сигнальным процессором. Приемопередатчик 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 приемника 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 (рис. 10). Центром радара является 1967ВН044, немного переделанный под данную задачу. Загружать ПО процессор может по SPI, соответственно, в качестве ПЗУ подходит почти любая «флешка».

ЦАП и АЦП выбираются по частоте, цене и возможности когерентного захвата данных. Сейчас реализована



Рис. 7. Фотография прототипа «однолучевого радара»



Рис. 8. Фотография макета «однолучевого радара»



Рис. 9. Фотография опытного образца «однолучевого радара»

простая схема, почти не загружающая процессорное время, – в ОЗУ хранится заранее сформированный фрагмент «пилы»; цепочка DMA передает данные в SPI_0 и в нужный момент перезапускает фрагмент этой «пилы», запуская таймер TMR0. TMR0 запускает другую цепочку DMA, которая собирает данные с SPI_1, выводы nCS двух АЦП объединены, выводы SDO, CLK заведены на буфер, TMR0 также управляет стробами 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 5559ИН14, а логический – SPI CAN-контроллер. Ethernet также выполнен на Ethernet-контроллере. Решение по CAN и Ethernet сейчас переносится на наш 1986BE1Q1, там уже есть CAN и Ethernet. Микросхема ГЛОНАСС используется не обычная, а «Навигационный приемник ГЛОНАСС/GPS/SBAS/GALILEO – ПРО-04, ИЛТА.464346.001» АО «НИИ микроэлектронной аппаратуры «Прогресс». Он подключается по UART и свои задачи выполняет успешно. Физический уровень RS-485 обеспечивает микросхема 5559ИН10. Таким образом видно, что сегодня вполне реально создать коммерческий продукт с очень высокой степенью локализации по ЭКБ.

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

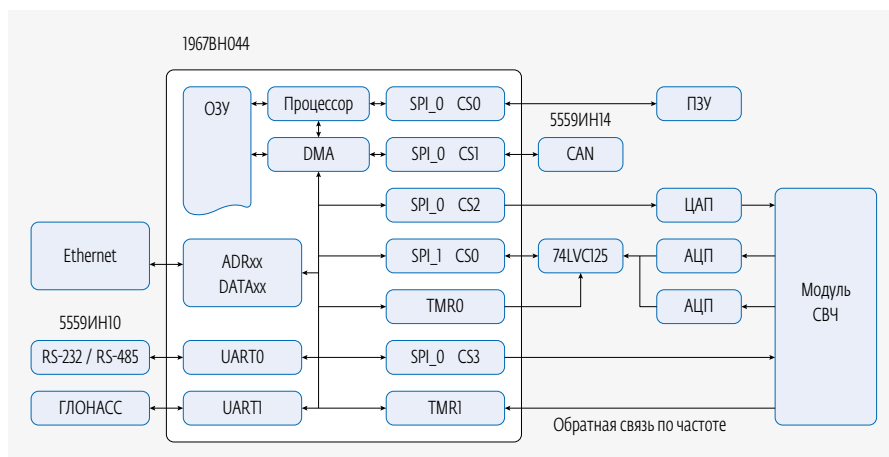


Рис. 10. Структурная схема опытного образца «однолучевого радара»

Разработкой СВЧ мы тоже занимаемся сами, но тут стоит отметить, что разработка – это не просто расчет AP нужной формы. Это долгий процесс «от идеи» и до «серийной сборки», включающий решение многих различных проблем. Например, есть нормы Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) (решение от 7 мая 2007 года № 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия»), по которым разрешенным диапазоном в России считается 24,05–24,25 ГГц. Это значит, что использовать мы можем ЛЧМ максимум 200 МГц (в то время как аппаратные возможности позволяют до 1500 МГц), и, применяя в качестве основного математического аппарата FFT, получаем следующее ограничение:

$$\frac{1}{T} = \frac{f_{BW}}{T} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta d}{c} \right),$$

$$\Delta d = \frac{c}{2 \cdot f_{BW}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2 \cdot 10^8} = 0,75 \text{ м.}$$

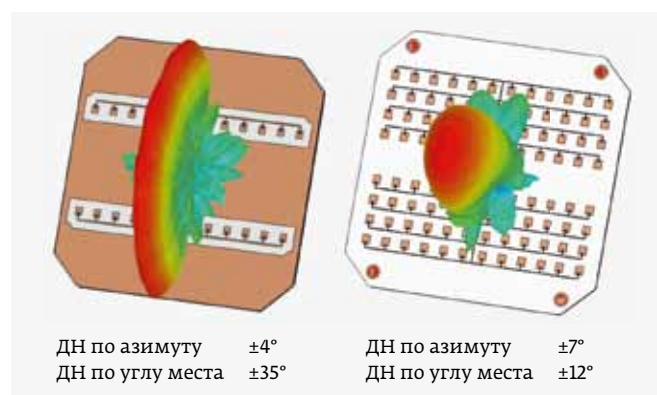


Рис. 11. Пример характеристик двух СВЧ-модулей с одинаковыми габаритами

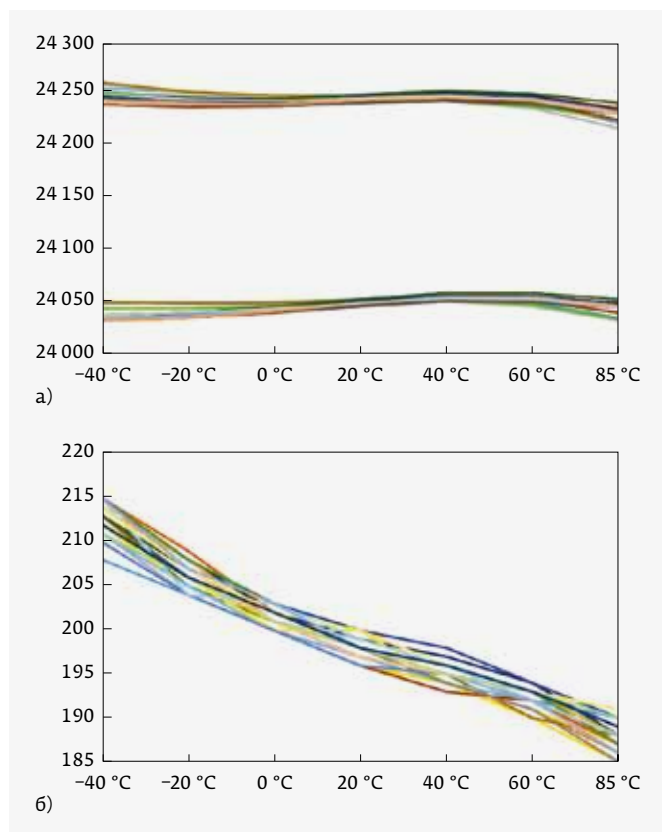


Рис. 12. Пример характеристик частотно-температурных зависимостей при подаче модулирующего сигнала лабораторным генератором: а – зависимость абсолютного значения частоты в МГц от температуры; б – зависимость полосы ЛЧМ-сигнала в МГц от температуры

Другими словами, если забыть про всё, что реально расширяет нам каждый бин FFT (например, наложение оконной функции), ЛЧМ в 200 МГц обеспечивает

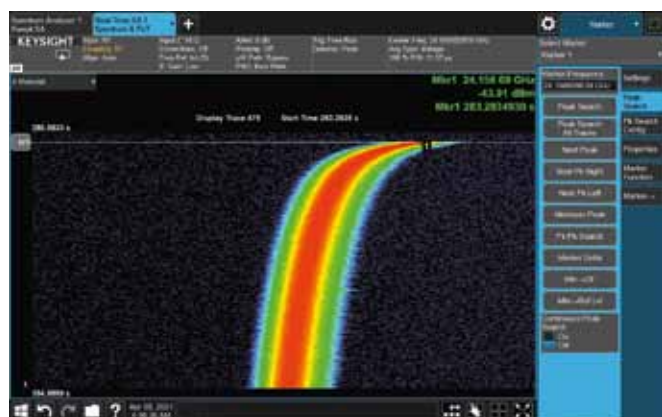


Рис. 13. Пример частотно-временной зависимости при включении радара

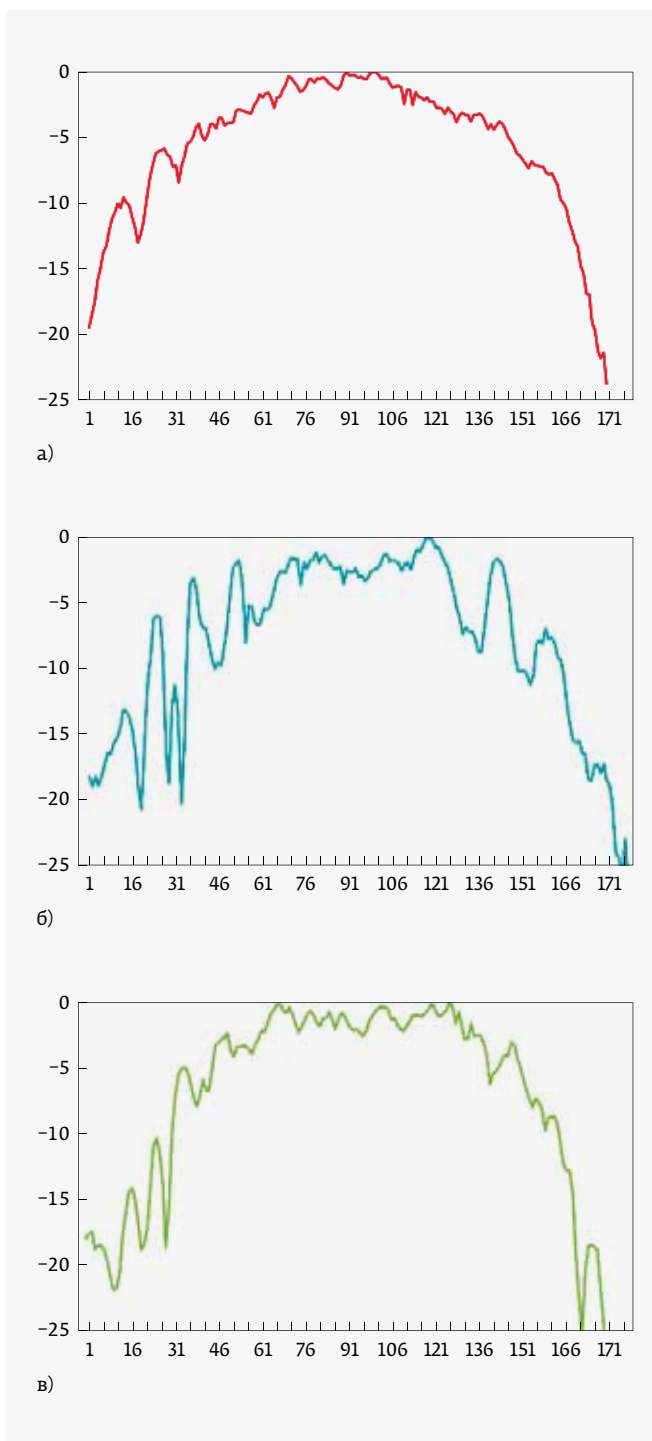


Рис. 14. Результаты измерения диаграммы направленности при использовании различных крышек: а – напечатанной на 3D-принтере со 100%-ным заполнением; б – такой же, но отлитой из «типового» пластика Vg280; в – отлитой из «типового» пластика, но расположенной на скорректированном расстоянии от АР. Представлены нормированные диаграммы направленности (по вертикальной оси указаны значения в дБ, по горизонтальной – в градусах)



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

разрешающую способность по дальности в 75 см. Но 200 МГц должны быть стабильными, иначе будет нарушение требований ГКРЧ. А так как мы должны использовать максимально доступные СВЧ-микросхемы, ожидаемо, что термостабилизация у них будет не очень хорошей. Можно и нужно вносить аналоговую термокомпенсацию (например, вводя термисторы в схему управления ГУН). Таких СВЧ-приемопередатчиков мы собрали уже несколько тысяч и можем поделиться обобщенной статистикой (рис. 12).

Видно, что термокомпенсация получилась неплохой, максимальный разброс составляет ± 15 МГц и при крайних значениях температуры (-40 °C, 85 °C). 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 требования ГКРЧ нарушаются, значит, нужна дополнительная стабилизация. В модуле СВЧ для этой цели предусмотрен сигнал

делителя частоты (см. рис. 10); сигнал делителя – низкочастотный, порядка 24 кГц – он подается на вход таймера TMR1. TMR1 записывает в память текущее значение счетчика «тиков» процессора, затем TMR1 отсчитывает до 1 000 и снова записывает значение счетчика «тиков» процессора. Сравнивая эти значения, можно получить достаточно точное значение частоты сигнала делителя.

Частоту СВЧ-сигнала нужно 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 рис. 13.

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 АР), в целом, всё будет приемлемо. 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 сужает диаграмму.

Таблица 1. Технические характеристики радара «Поток-1»

Параметр	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, °C	От -40 до $+75$
Габаритные размеры, мм, не более	$140 \times 120 \times 35$
Масса, кг, не более	0,3
Возможность оснащения модулем отечественного ГЛОНАСС/GPS-приемника	Опционально
Возможность оснащения интерфейсами Ethernet, CAN, RS-485, RS-232	Опционально



Рис. 16. Применение радара «Скорость-1» для информирования об опасном участке дороги

Приведем пример измерений для немного другого радара с использованием следующих крышек: напечатанной на 3D-принтере со 100%-ным заполнением (рис. 14а); такой же, но отлитой из «типового» обычного пластика Vg280 (рис. 14б); отлитой из «типового» пластика, но расположенной на скорректированном расстоянии от АР (рис. 14в).

В общем, нюансов множество, но со всеми можно справиться.

Рассмотрим приборы, разработанные на основе «однолучевого радара». Радар «Поток-1», ТСКЯ.466369.007, (табл. 1) является радиолокационным детектором транспортных средств (ТС) и предназначен для автоматизированного учета интенсивности дорожного движения. Детектор определяет следующие основные параметры: количество обнаруженных ТС, среднюю скорость, загруженность, количество полос, классификацию обнаруженных ТС; а для каждого из обнаруженных ТС – скорость, длину, класс, номер полосы движения.

Детектор располагается возле контролируемого участка дорожного полотна на высоте 4–6 м 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, рис. 15).

Таблица 2. Технические характеристики радара «Скорость-1»

Параметр	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

Радар «Скорость-1», ТСКЯ.466369.006, (табл. 2) 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.

Радар (рис. 16) может быть использован и как самостоятельный прибор, 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 на частных территориях.

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.

Сегодня работа над созданием новых автомобильных радаров в АО «ПКК Миландр» продолжается. ●

RISC-V — современная высококачественная процессорная архитектура с открытой системой команд (ISA)



- Свободная архитектурная лицензия
- Уменьшение времени разработки специализированных микроконтроллеров и процессоров
- Уменьшение времени разработки конечных устройств
- Развита экосистема программного обеспечения для RTOS, Linux, библиотек и средств разработки
- Возможность расширения системы команд
- Открытость и невозможность контроля со стороны отдельных компаний
- Поддержка со стороны крупных мировых компаний — отраслевая non-profit ассоциация (Google, Nvidia, Samsung, Western Digital и др.)

Перспективы развития RISC-V в разработках компании «Миландр»

Микроконтроллер K1986BK025 ОКР «Счетчик М»

- Архитектура BM-310S, 32 бита (RV32IMC)
- Аналог ARM Cortex-M3
- До 60 МГц
- Низкое потребление

Защищенный микроконтроллер ОКР «Вязь»

- Архитектура BR-351S, 32 бита (RV32IMCFNA)
- Аналог ARM Cortex-R5
- До 300 МГц
- Высокая производительность во встраиваемых системах

Коммутационный процессор ОКР «Перспектива»

- Архитектура BI-671, 64 бита (RV64GC)
- Архитектура BR-351S, 32 бита (RV32IMCFNA)
- До 800 МГц
- Аналог ARM Cortex-A9
- Поддержка многоядерности
- Выбор ядер с разной производительностью

ПРИМЕНЕНИЕ:

- Современные интеллектуальные приборы и системы учета
- Интеллектуальные контроллеры
- Системы управления в реальном времени
- Промышленная автоматизация
- Контроллеры АСУ ТП
- Искусственный интеллект



+7 (495) 981-54-33 (доб. 707) / ic@milandr.ru / WWW.MILANDR.RU

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА

+7 (495) 221-13-55 / forum.milandr.ru / support@milandr.ru

