

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ОБРАБОТКИ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ

Силантьев А. М., Примаков Е. В., Переверзев А. Л., Осадчий И. С.
Институт МПСУ, Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»
Зеленоград, Российская Федерация
E-mail: silantiev@org.miet.ru

На основе анализа структуры радиолокационных датчиков малой дальности с использованием непрерывного частотно-модулированного излучаемого сигнала предложена его реализация с помощью специализированной системы на кристалле на архитектуре RISC-V. Рассмотрены характеристики, принципы построения и основные алгоритмы обработки сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные системы (РЛС) широко применяются в различных военных и гражданских отраслях, например, в авиации, морском и наземном транспорте, метеорологии и даже в археологии. Особое место занимают РЛС малой дальности, ориентировочно, до десятков метров, которые применяются, в частности, в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и автомобилестроении.

В БПЛА набор радиолокационных датчиков может быть использован для точной оценки высоты аппарата над землёй, его автоматизированной посадки, а также для обнаружения и избегания препятствий при полёте. В автомобилях датчики РЛС малой дальности используются как составная часть систем помощи водителю (ADAS - Advanced Driver-Assistance Systems) [1]. Возможно применение РЛС малой дальности действия для определения характеристик дорожного полотна [2] и работы адаптивной системы подвески. В МИЭТ также создана и экспериментально опробована бесконтактная радиолокационная система измерения толщины льда перед автомобилем [3] для безопасного передвижения по зимникам в руслах замерзших рек, что особенно важно для практически лишенных дорог зон севера РФ и Сибири.

I. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В НИУ МИЭТ накоплен существенный опыт по проектированию подобных систем для различных применений в С-, X- и К- диапазонах частот. Вопрос уменьшения стоимости радиолокационных датчиков и их доступности для потребителя становится ключевым. Одним из путей удешевления аппаратуры РЛС малой дальности является сокращение производственных издержек за счет уменьшения номенклатуры и количества применяемых элементов, создания специализированных наборов интегральных микросхем, исключения процедур настройки и проверки отдельных узлов устройства.

Наиболее распространенным и простым решением технической реализации РЛС малой дальности действия является использование непрерывного излучаемого сигнала с частотной модуляцией (Frequency Modulated Continuous Wave – FMCW) [4], [5]. Обобщенная блок-схема FMCW радиолокационного датчика приведена на рис.1. Датчик включает в себя два основных блока – приемно-передатчик и устройство цифровой обработки сигналов (ЦОС), а также приемную и передающую антенны.

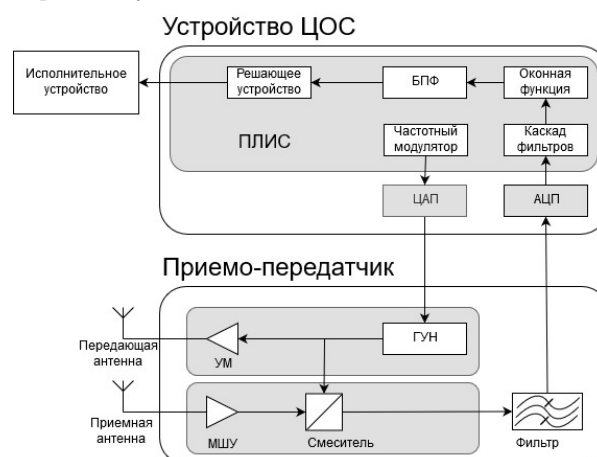


Рис. 1 – Блок-схема РЛС ближней зоны с непрерывным ЧМ излучением

Передающий канал образован генератором управляемым напряжением (ГУН) и усилителем мощности (УМ). Приемный канал содержит малошумящий усилитель (МШУ) и смеситель, использующий в качестве опорного напряжения тот же сигнал, который излучается передатчиком. Таким образом, в приемно-передатчике происходит преобразование на нулевую промежуточную частоту. Выходной фильтр приемного канала выделяет требуемый диапазон частот биений.

Устройство ЦОС, включает в себя аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый (ЦАП) преобразователи, а также цифровой процессор. Устройство ЦОС отвечает за формирование сигнала управления частотой передатчика, который через ЦАП поступает на вход управления частоты

той ГУН. Выходной сигнал приемного канала оцифровывается с помощью АЦП и поступает в цифровой процессор на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Подобная структура позволяет строить радиолокационные датчики доплеровского, дальномерного и комбинированного типа, причем конкретное функционирование определяется только программой ЦОС.

Для решения описанных выше проблем создается специализированная система на кристалле (СнК) (рис.2) основанная на процессорном ядре с открытой архитектурой RISC-V, ЦОС-ускорителе и аналогово-цифровой обвязке в виде ЦАП, АЦП, памяти.

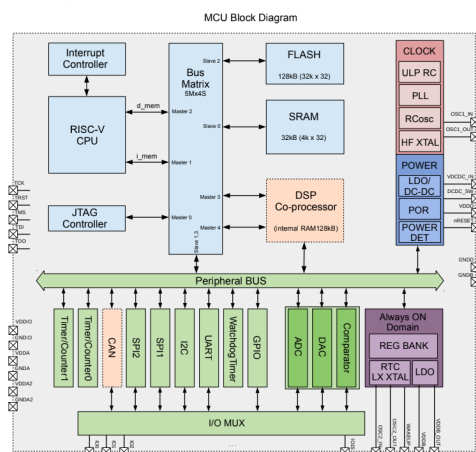


Рис. 2 – Блок-схема микросхемы ЦОС

Алгоритм работы ЦОС разбивается на первичную и вторичную обработку данных, которые отличаются, главным образом, скоростью обработки и объемом потока данных. Первичная обработка данных включает в себя операции над высокоскоростным потоком входных данных: первичную фильтрацию, взвешивание и анализ частотного спектра сигнала на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье, адаптивное пороговое обнаружение сигнала. Для выполнения первичной обработки в масштабе реального времени требуется высокая производительность вычислительного устройства. Для повышения производительности при сохранении низкого энергопотребления в состав системы включены специализированные аппаратные блоки-ускорители.

В задачи вторичной обработки входит изменение параметров объекта наблюдения (дальности, скорости, траектории), принятие решения на срабатывание исполнительных устройств. Методы вторичной обработки могут различаться как для разных применений, так и для различных режимов работы одного устройства. Исходя из

этого, наиболее эффективно выполнять вторичную обработку сигнала программно, используя процессорное ядро.

Таким образом, СнК включает в себя, как специализированное высокопроизводительное ядро, предназначенное для первичной обработки сигнала, так и 32-разрядное процессорное ядро для вторичной обработки, управления и обмена данными по внешним интерфейсам. Ключевыми особенностями СнК являются высокая производительность, низкое энергопотребление и занимаемая площадь на кристалле, возможность гибкого конфигурирования для использования в составе разных по характеристикам и назначению устройств. Прототип СнК произведен по технологии 180 нм и обладает следующими характеристиками: тактовая частота пяти-стадийного RISC-V процессора до 120 МГц, размер ОЗУ 128 Кбайт, BootROM с загрузкой из внешней QSPI-памяти, интерфейсы CAN, SPI, I2C, GPIO, UART, наличие параллельных интерфейсов для внешних АЦП и ЦАП, интегрированный АЦП 12-бит с скоростью до 15 MSPS, интегрированный ЦАП 12-бит с скоростью до 5 MSPS, тактовая частота интегрированного ЦОС-ускорителя до 100 МГц. В ЦОС-ускорителе реализованы конфигурируемые потоковые вычислители для фильтра постоянной составляющей, КИХ-фильтра 128 порядка, оконной функции, СС-фильтра, конвейерного БПФ на 4096 точек, вычисление модуля комплексного числа, DMA-блок с детектированием пиков в спектре и блок управления модуляцией и приемом информационного сигнала.¹

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advanced driver-assistance systems [Электронный ресурс] Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_driver-assistance_systems Дата обращения: 14.10.2023.
2. A. Bystrov, E. Hoar, T.-Y. Tran, N. Clarke, M. Gashinova, M. Cherniakov. Sensors for Automotive Remote Road Surface Classification, – Proc. 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Sept. 12-14, 2018, Madrid, Spain.
3. Ju. Kosova, D. Kaleev, V. Sizov, P. Metelkov, Device for Determining the Thickness and Properties of Ice Cover on the Water Surface Using a Frequency-Modulated Signal. – Proc. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus-2019), Moscow, MIET, 2019, pp. 1639 – 1643.
4. И.В. Комаров, С.М. Смольский, "Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний". – М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 366 с.
5. G. M. Brooker, Understanding Millimetre Wave FMCW Radars, Proc. 1st International Conference on Sensing Technology, Nov. 21-23, 2005 Palmerston North, New Zealand, pp. 152-157.

¹Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта "Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности" по гос.заданию на выполнение научно- исследовательской работы "Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)".