

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА РАДИОЛОКАТОРА UHF-ДИАПАЗОНА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЛЯ ГУМАНИТАРНОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ *RED PITAYA*

Понедько Д.Н., Киевский А.М., Рогачева Я.Д., Нгуен Хоанг Хиен, гр. 141301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

Научный руководитель – д.т.н., проф. Колов С.В.

Аннотация. В статье представлена разработка радиолокатора UHF-диапазона (550–700 МГц) с непрерывным частотно-модулированным излучением (FMCW), предназначенного для использования на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) в целях гуманитарного разминирования. Основное внимание уделено применению системы на кристалле *Red Pitaya* для реализации компактного и энергоэффективного решения. Рассмотрены структурная схема радиолокатора, особенности выбора параметров сигнала, а также оценены его характеристики. Показано, что использование *Red Pitaya* позволяет упростить схему радиолокатора и обработку сигналов.

Ключевые слова. Радиолокатор с синтезированием апертуры, FMCW, БЛА, *Red Pitaya*.

Введение

Гуманитарное разминирование остается актуальной задачей, требующей разработки безопасных и эффективных технических средств. Традиционные методы, такие как миноискатели и радары подповерхностного зондирования, обладают относительно низкой производительностью и создают риски для операторов. Решение этой проблемы в некоторых ситуациях потенциально возможно с использованием бортовых радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) на беспилотных летательных аппаратах (БЛА).

Цель данной работы — разработка компактного радиолокатора UHF-диапазона на базе системы на кристалле *Red Pitaya*, обеспечивающего высокую разрешающую способность и возможность обнаружения объектов, скрытых растительностью или слабозаглубленных в сухую почву.

Основные параметры радиолокатора. Параметры зондирующего сигнала и носителя

В нашем случае радиолокатор расположен на БЛА, способном лететь по заданной траектории с малым радиусом разворота со скоростью полета $V = 10 \dots 30$ м/с (36...96 км/ч). Высота полета БЛА составит от 10 до 200 метров.

В качестве зондирующего используется ЛЧМ-сигнал, с полосой частот 550 – 700 МГц. Использование такого сигнала позволяет обнаруживать предметы под густой растительностью и на небольшом углублении в сухую почву. Использование ЛЧМ-сигнала на РСА позволяет получить высокую разрешающую способность по наклонной дальности при низких требованиях к аппаратуре обработки сигнала. Используемый сигнал имеет период повторения $T_r = 1$ мс. Время синтеза сигнала, в зависимости от высоты полета, $T_c = 1 - 4$ с.

Антенна установлена под углом 45° относительно горизонта, что, при высоте полета 10 – 200 метров, обеспечивает дальность наблюдения 15 – 450 метров. Геометрия радиолокационного наблюдения представлена на рисунке 1, где H – высота полета БЛА, ширина главного лепестка диаграммы направленности вибратора 30° [2].

Основные характеристики *Red Pitaya*

Red Pitaya STEMLab 125-14 Z7020-LN представляет из себя плату, на которой установлены ПЛИС *FPGA Xilinx Zynq 7020 Soc* и процессор *Dual core ARM Cortex-A9*. Плата имеет 512 МБ оперативной памяти и возможность установки Micro SD карты объемом до 32 ГБ в качестве постоянной памяти. Имеются два 14-ти битных АЦП и два 14-ти битных ЦАП с максимальной частотой дискретизации 125 МГц и частотой среза ФНЧ на выходах ЦАП 60 МГц. Имеются интерфейсы передачи данных *I2C, SPI, UART, CAN, USB, Ethernet*, так же есть возможность передачи данных по *Wi-Fi*, благодаря чему, при необходимости, возможна передача принятого сигнала на наземный пункт управления в реальном времени. Питание платы происходит через *MicroUSB*. На плате имеется 22 цифровых входов/выходов, 4 аналоговых входа и 4 аналоговых выхода. Вес платы без корпуса составляет 400 грамм. Максимальное потребление 10 Ватт.

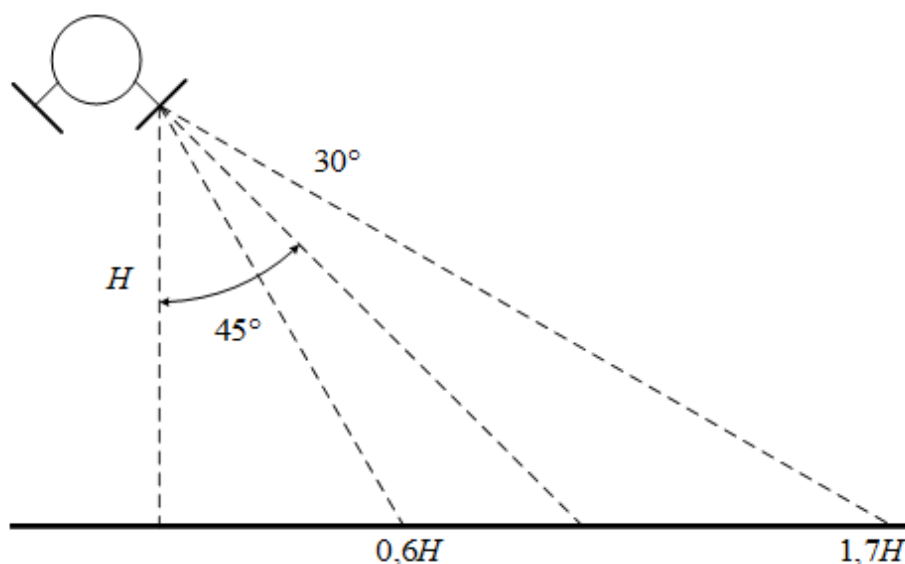


Рисунок 1 – Геометрия радиолокационного наблюдения

Структурная схема радиолокатора

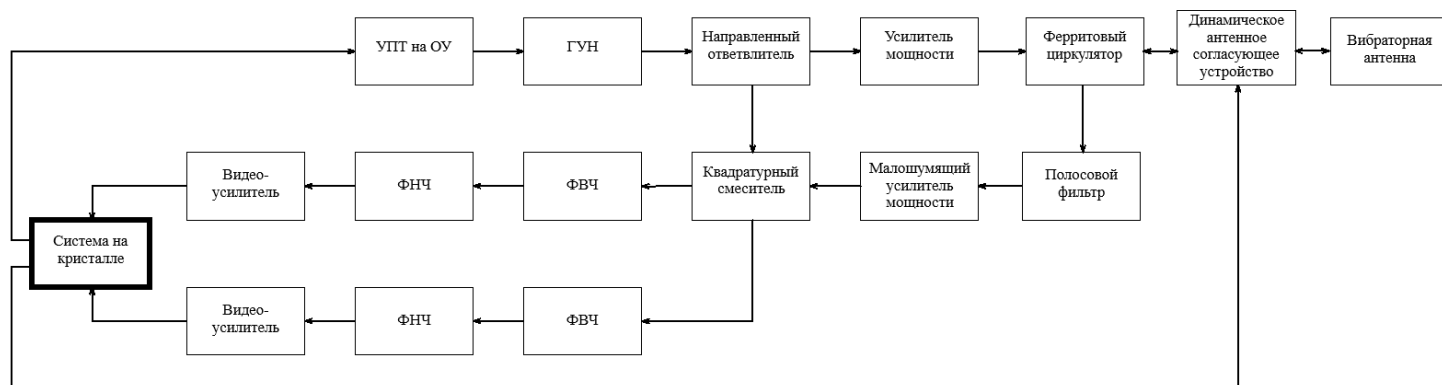


Рисунок 2 – Структурная схема РСА

На рисунке 2 представлена разработанная структурная схема радиолокатора. РСА имеет прямое преобразование с квадратурным смесителем.

На базе *Red Pitaya* можно реализовать АЦП, формирователь управляющего сигнала для ГУН, систему цифровой обработки сигнала, управление динамическим антенным согласующим устройством [3].

Частота дискретизации АЦП зависит от разностной частоты на выходе смесителя, которая может быть рассчитана по формуле $f_{p.макс} = \frac{2 \cdot \Delta f_0}{T_r} \cdot \frac{r_{макс}}{c}$. В нашем случае максимальная дальность $r_{макс} = 450$ м, полоса частот $\Delta f_0 = 150$ МГц, период зондирующего сигнала $T_r = 1$ мс, что соответствует максимальной разностной частоте на выходе смесителя 450 кГц. Так как мы используем квадратурный смеситель, то эта частота делится на два, получаем максимальную разностную частоту – 225 кГц. Разрядность АЦП зависит от динамического диапазона на выходе смесителя. Использование 14-ти битного АЦП покрывает весь динамический диапазон (20-30 дБ), что позволяет избавиться от аттенюаторов для квадратурного и синфазного сигналов, что упрощает конструкцию и управление РСА.

Использование ЦАП совместно с ГУН выполняет функцию формирователя зондирующего сигнала. В нашем случае возможно использование ГУН *V560ME09-LF*, который может генерировать частоты от 400 до 800 МГц. Формирование зондирующего сигнала таким способом позволяет избавиться от переходных процессов. На рисунке 3 представлен график зависимости частоты генерируемого ГУНом сигнала от управляющего напряжения. В связи с тем, что выходное напряжение ЦАП находится в диапазоне от -1 до 1 В, необходимо использование усилителя постоянного тока на операционном усилителе (ОУ) с коэффициентом усиления 4.

Управление динамическим антенным согласующим устройством можно осуществить при помощи цифровых выводов *Red Pitaya*. В определенные моменты времени, соответственно с текущей частотой зондирующего сигнала, подаются необходимые управляющие импульсы.

При помощи *Red Pitaya* происходит обработка принятой последовательности отраженных сигналов и последующая запись на карту памяти. Так же возможен вариант передачи принятого сигнала на наземный пункт

управления по средствам *Wi-Fi*, *Red Pitaya* имеет в своем составе модуль *Wi-Fi*. Это делает возможным работу РСА в режиме видео.

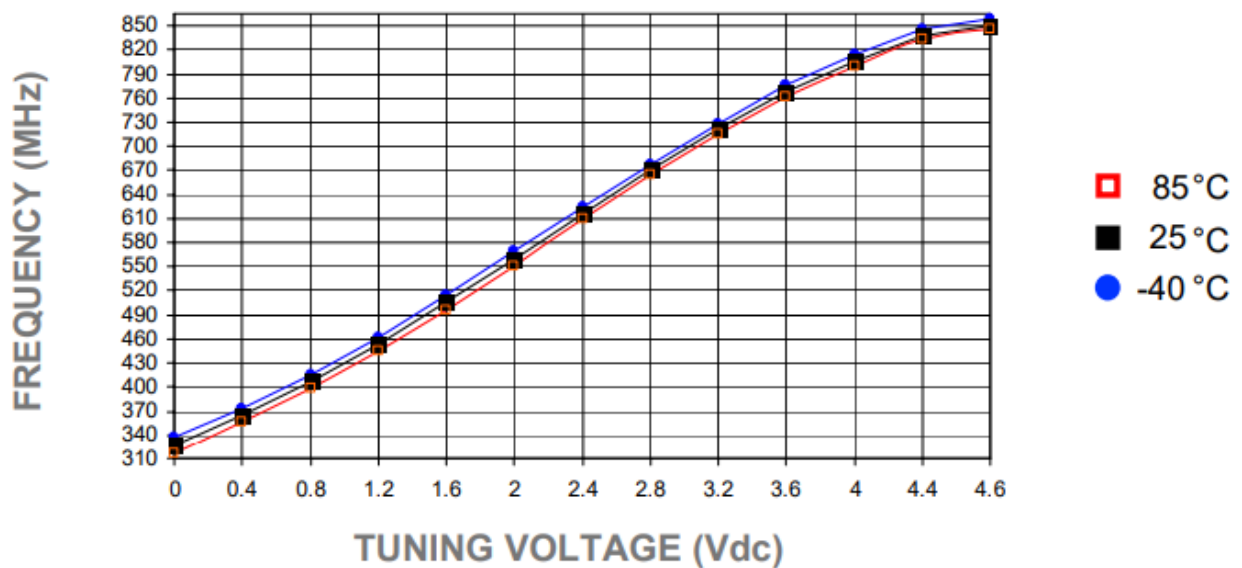


Рисунок 3 – Зависимость частоты выходного сигнала ГУН от входного напряжения

Все это делает структуру радиолокатора проще, облегчает конструкцию, делает его более энергоэффективным, добавляет гибкости в настройке и работе РСА, позволяет реализовать различные алгоритмы обработки сигналов.

Заключение

Разработанный радиолокатор *UHF*-диапазона на базе *Red Pitaya* демонстрирует высокую эффективность для задач гуманитарного разминирования. Компактность, энергоэффективность и возможность интеграции с БЛА делают его перспективным решением для обнаружения слабозаглубленных и скрытых под растительностью объектов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию алгоритмов обработки сигналов и расширение функциональности системы.

Список использованных источников

1. Купряшкин, И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. – М.: Радиотехника, 2020.
2. Понедько Д.Н. Облик бортового радиолокатора с синтезированием апертуры на беспилотном летательном аппарате для гуманитарного разминирования / Киевский А.М., Понедько Д.Н., Нгуен Хоанг Хиеп, Козлов С.В // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024. – С. 167-171.
3. Киевский А.М. Способ динамического согласования приемо-передающего тракта и антенны радиолокатора с непрерывным излучением и частотной модуляцией / А.М. Киевский, Д.Н. Понедько, С.В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии-2024 : материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции, Минск, 21–22 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2024. – С. 45–48.
4. Кузнецов, В. А., Гончаров С. А. Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия / Кузнецов, В. А., Гончаров С. А. // Системы управления, связи и безопасности, №3, 2017. – С. 28-72.
5. Кузнецов, В. А., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Краткий опыт создания и первые результаты практической съемки поверхности малогабаритной РЛС с синтезированием апертуры антенны с борта мультикоптера / Кузнецов, В. А., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. // Журнал радиоэлектроники, №4, 2019.
6. С.Г. Брайткрайц. Проблемы и пути создания радиолокационных систем для беспилотных летательных аппаратов тактического и оперативно-тактического назначения / С.Г. Брайткрайц, Е.М. Ильин, А.И. Полубехин, Д.В. Прищеп, А.Д. Юрин, К.А. Хомяков. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 11 – С. 303-313.
7. D.A. Akmaykin, E.A. Bolelov, A.I. Kozlov, B.V. Lezhankin, A.E. Svistunov, Y.G. Shatrakov. Theoretical Foundations of Radar Location and Radio Navigation. – Springer Aerospace Technology, Singapore, 2021.

UDC 621.396

DEVELOPMENT OF AN UHF-BAND RADAR WITH CONTINUOUS FREQUENCY-MODULATED EMISSION BASED ON THE RED PITAYA CRYSTAL SYSTEM

Ponedko D.N., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article presents the development of a UHF-band (550-700 MHz) continuous frequency modulated radar (FMCW) designed for use on unmanned aerial vehicles (UAVs) for humanitarian demining. The focus is on the application of the Red Pitaya system-on-chip to realise a compact and energy-efficient solution. The structural scheme of the radar, peculiarities of signal parameter selection, and its characteristics are considered. It is shown that the use of Red Pitaya allows to simplify signal processing and increase the accuracy of detection of weakly buried objects.

Keywords. Aperture synthesis radar, FMCW, UAV, Red Pitaya.