

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-92-96
УДК 519.688

Поступила: 17.03.2026г.
Сдана на рецензию: 19.03.2026г.
Подписана к печати: 15.04.2026г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО РАДАРА НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ SDR В СРЕДЕ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ И ИНСТРУМЕНТАРИЯ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

С.Ж. Оганнесян, Э.Р. Сиволенко

*Российско-Армянский университет
seroj00hovhannisyanyan@gmail.com, eduard.sivolenko@rau.am*

АННОТАЦИЯ

Радиолокационные системы классифицируются по типу зондирующего сигнала, включая непрерывные (CW), частотно-модулированные непрерывные (FMCW), ступенчато-частотные непрерывные (SFCW) и импульсные радары. Выбор сигнала определяет архитектуру системы и методы обработки отраженных сигналов. В данной работе рассматривается многочастотный радиолокатор непрерывной волны (MFCW), основанный на использовании набора дискретных частот для оценки дальности целей по фазовым соотношениям отраженных сигналов. По сравнению с классическими CW- и FMCW-подходами, MFCW обеспечивает повышенную информативность при умеренной сложности реализации и хорошо подходит для экспериментальных исследований. Реализация MFCW-радары выполнена на базе программно-определяемого радио (SDR) с использованием среды GNU Radio и специализированной библиотеки gr-radar, предназначенной для радиолокационной обработки сигналов. Инструментарий gr-radar предоставляет готовые блоки для формирования сигналов, фазовой обработки и оценки дальности, что позволяет реализовать обработку в реальном времени и ускоряет прототипирование системы. Для повышения отношения сигнал/шум в работе применяется согласованная фильтрация, реализуемая в рамках используемого программного инструментария. Такой подход обеспечивает эффективное обнаружение отраженных сигналов при относительно низких вычислительных затратах, что особенно важно для SDR-реализаций радиолокационных систем.

Ключевые слова: GNU Radio, USRP, радар, MFCW, gr-radar.

Введение

Существует 4 основных класса радаров в зависимости от типа передаваемых ими сигналов: непрерывные волны (CW), частотно-модулированные непрерывные волны (FMCW), ступенчато-частотные непрерывные волны

(SFCW) и импульсные волны. В рамках данной работы мы использовали MFCW сигнал – разновидность CW-сигналов. Его главное преимущество перед сигналами CW или FMCW заключается в том, что MFCW позволяет одновременно отслеживать несколько объектов за счет разных частот. В качестве программной среды использовали GNU Radio, поскольку она более доступна довольно широкому сегменту общества и особенно инженерам. Кроме того, GNU Radio легче и гибче, поскольку позволяет импортировать библиотеки через Python. Также следует отметить, что GNU Radio предназначено для работы с сигналами SDR. Одними из важнейших узлов радаров являются фильтры и особенно согласующий фильтр. Основа их работы заключается в том, что отправляется известный сигнал, а отраженный сигнал проверяется на наличие общих элементов выходного сигнала. Этот фильтр улучшает отношение сигнал/шум за счет уменьшения спектральной полосы шума и, кроме того, уменьшает шум в полосе пропускания вейвлета за счет формы спектра вейвлета. Он имеет оптимальную производительность и низкие вычислительные затраты.

Материалы и методы

Как мы уже знаем MFCW-радар (Multi – “Frequency Continuous Waveform”) – это радар непрерывной волны, который работает на нескольких частотах передачи одновременно и использует общую обработку сигнала для эхо-сигналов. Этот тип радара обычно использует спектрограммный анализ полученного эхо-сигнала и смешивает его в основную полосу и, следовательно, способен обнаруживать и разрешать две цели с разными скоростями, но на одинаковом расстоянии.

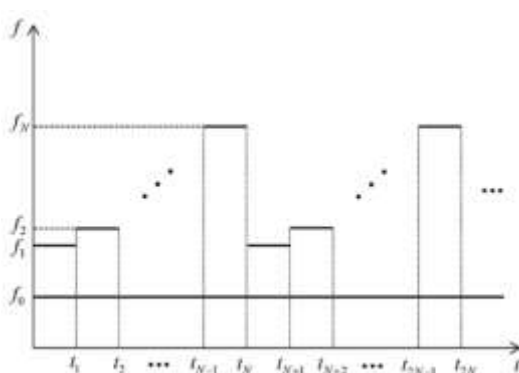


Рис. 1. Частотно-временной график сигнала MFCW.

В отличие от традиционных аппаратно-ориентированных реализаций, в данной работе предлагается программный подход к реализации MFCW-радар на основе библиотеки gr-radar среды GNU Radio. Использование данного инструментария рассматривается как метод программного прототипирования радиолокационных систем с использованием SDR.

Gr-radar представляет собой открытый программный модуль типа Out-of-Tree (OOT) для среды GNU-Radio, предназначенный для генерации и обработки радиолокационных сигналов в системах программно-определяемого радио (SDR). Данный инструментарий разработан с целью ускоренного прототипирования радиолокационных систем и предоставляет набор специализированных функциональных блоков, которые могут быть интегрированы в потоковые схемы (flowgraph) среды GNU Radio.

Библиотека gr-radar включает модули для реализации различных этапов обработки радиолокационных сигналов, таких как формирование зондирующих сигналов, цифровая обработка принимаемых сигналов, анализ фазовой информации, оценка дальности до цели, а также визуализация полученных данных.

Инструментарий построен на модульной архитектуре GNU Radio и поддерживает использование блоков, реализованных на языках Python и C++. Это обеспечивает гибкость при разработке радиолокационных алгоритмов и упрощает интеграцию с SDR-устройствами, такими как устройства семейства USRP. Важной частью является эхотаймер UHD, который позволяет синхронизировать потоки TX и RX, принимаемые от USRP, для обеспечения стабильной фазовой связи при измерениях. Благодаря этому становится возможной реализация обработки сигналов в режиме реального времени.

Основными преимуществами использования gr-radar являются возможность быстрого прототипирования радиолокационных алгоритмов, модульная структура обработки сигналов, совместимость с SDR-платформами и открытый исходный код, позволяющий исследователям модифицировать и адаптировать алгоритмы под конкретные задачи [1,2,3,4,5].

Результаты

На Рис.2 представлена реализованная структура обработки радиолокационного сигнала в среде GNU Radio. В данной конфигурации используются функциональные блоки библиотеки gr-radar, которые обеспечивают формирование многочастотного сигнала, его обработку и последующий анализ отраженных сигналов. Применение данного инструментария позволило построить полный тракт обработки радиолокационных данных в рамках программно-определяемой радиосистемы.

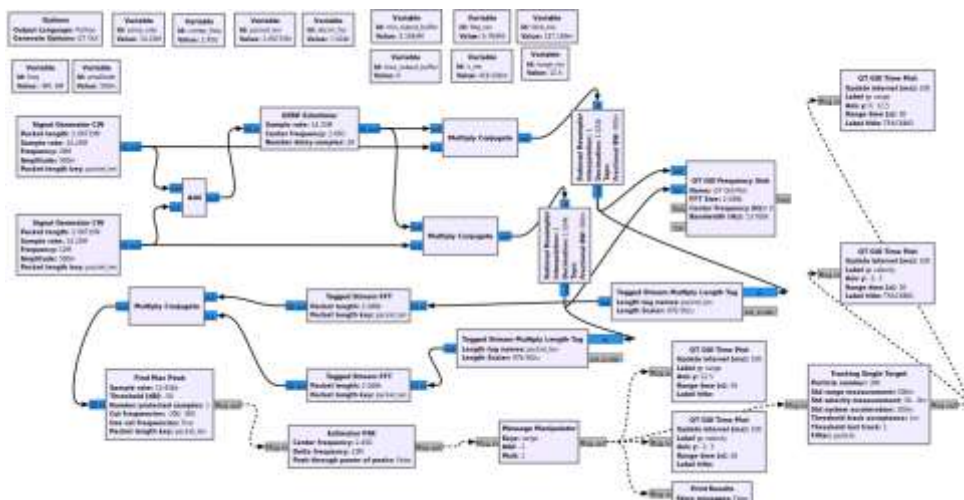


Рис. 2. Кода радара MFCW.

После запуска разработанной программной схемы выполняется обработка принимаемых сигналов и формирование выходных данных, отражающих параметры обнаруженных целей. На Рис. 3 представлены результаты работы системы, полученные в процессе выполнения программы. Данные результаты демонстрируют возможность практической реализации MFCW-радиолокатора с использованием среды GNU Radio и библиотеки gr-radar.

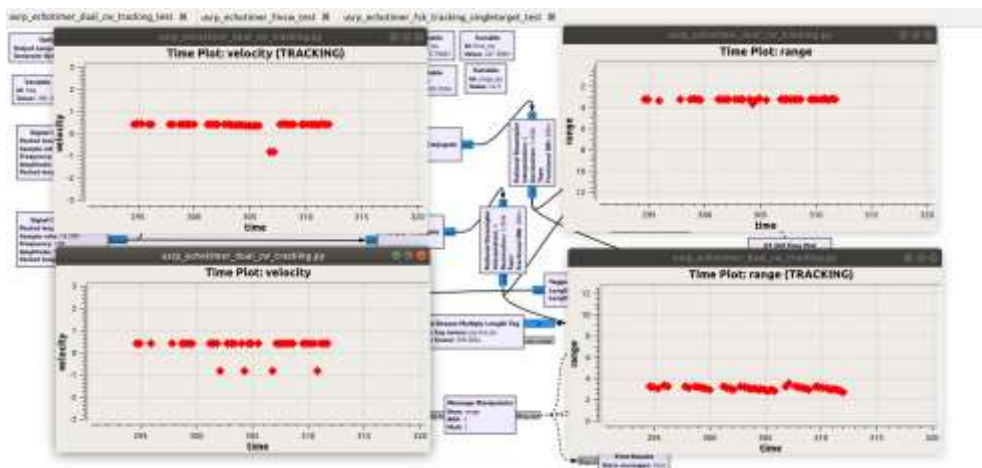


Рис. 3. Полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Radar#Configurations>
2. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/radar-signal>
3. <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp33.en.html>
4. <https://www.elprocus.com/matched-filter/>
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Matched_filter#:~:text=The%20matched%20filter%20is%20the,of%20the%20out%2Dgoing%20signal.
6. C. Ryu and C. Lee, "Phase Difference Compensation Method for Range Estimation in an MFCW-CW Radar," *IEEE Access*, vol. 9. PP. 80716–80727, 2021, DOI:10.1109/ACCESS.2021.3084734.
7. <https://www.cgran.org/111980/>
8. gr-radar: GNU Radio Radar Toolbox, GitHub repository. Available: <https://github.com/kitcel/gr-radar>

INVESTIGATION AND IMPLEMENTATION OF A MULTI-FREQUENCY CONTINUOUS WAVE RADAR USING SDR SYSTEMS IN AN OPEN-SOURCE ENVIRONMENT AND THE PYTHON PROGRAMMING TOOLKIT

S. Hovhannisyán, E. Sivolenko

Russian Armenian University

ABSTRACT

Radar systems are classified according to the type of transmitted probing signal, including continuous-wave (CW), frequency-modulated continuous-wave (FMCW), stepped-frequency continuous-wave (SFCW), and pulsed radars. The choice of signal determines the system architecture and the methods used for processing the reflected signals. In this work, a multi-frequency continuous-wave (MFCW) radar is considered, which is based on the use of a set of discrete frequencies to estimate the target range from the phase relationships of the reflected signals. Compared with conventional CW and FMCW approaches, MFCW provides increased informational content with moderate implementation complexity and is well suited for experimental studies. The implementation of the MFCW radar is carried out using software-defined radio (SDR) based on the GNU Radio environment and the specialized **gr-radar** library designed for radar signal processing. The **gr-radar** toolkit provides ready-made blocks for signal generation, phase processing, and range estimation, enabling real-time signal processing and accelerating system prototyping. To improve the signal-to-noise ratio, matched filtering is applied within the utilized software framework. This approach ensures efficient detection of reflected signals with relatively low computational cost, which is particularly important for SDR-based radar implementations.

Keywords: GNU Radio, USRP, radar, MFCW, gr-radar.