

---

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-85-91  
УДК 621.396.96

Поступила: 06.02.2026г.  
Сдана на рецензию: 19.02.2026г.  
Подписана к печати: 19.02.2026г.

### ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО- МОДУЛИРОВАННЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛН (ЛЧМ, FMCW) В ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ РАДИОСИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ СРЕДСТВ

*Э.Р. Сиволенко, М.В. Пинамян, Б.А. Оганнесян*

*Российско-Армянский университет  
eduard.sivolenko@rau.am, mpinamyam@gmail.com,  
babkenhovhannisyan96@gmail.com*

#### АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается частотно-модулированная непрерывно-волновая радиолокационная технология, широко применяемая в современных измерительных радиолокационных системах. Основное внимание уделяется программной реализации FMCW-радаров с использованием программно-определяемого радио на базе платформы USRP и среды GNU Radio.

Целью исследования является получение функциональной имплементации радара [1] посредством блочной архитектуры и экспериментальная проверка его основных радиолокационных характеристик. В рамках работы реализованы формирование и моделирование отраженных сигналов, цифровая обработка сигнала биений. Экспериментальные исследования направлены на анализ спектральных характеристик.

Показано, что программно-определяемый подход обеспечивает высокую гибкость настройки параметров ЛЧМ-сигнала и позволяет эффективно исследовать влияние полосы частот, длительности частотного свипа и частоты дискретизации на результаты измерений. Полученные результаты подтверждают применимость GNU Radio и USRP в качестве универсальной экспериментальной платформы для исследования FMCW-радиолокационных систем [2] и могут быть использованы при разработке автомобильных радаров, систем предотвращения столкновений и других радиолокационных приложений ближнего действия.

**Ключевые слова:** программно-определяемое радио, функциональные принципы радиолокационных технологий, GNU Radio, цифровая обработка сигналов.

## Введение

Частотно-модулированные непрерывноволновые радиолокационные системы занимают важное место в современной радиолокации благодаря высокой точности измерений, компактности и сравнительно низкой стоимости реализации. Первые теоретические и практические исследования ЛЧМ-радаров были проведены в середине XX века [3], после чего данная технология получила широкое применение в измерительных системах. В последние годы интерес к FMCW-радарам значительно возрос в связи с развитием автомобильных систем помощи водителю и автономного управления [4].

Современные FMCW-радары применяются в системах предотвращения столкновений, контроля «слепых зон», обнаружения посторонних объектов, а также в метеорологических [5] и навигационных системах [6]. Основным преимуществом данной технологии является возможность одновременного измерения дальности и относительной скорости объекта за счет анализа частоты сигнала биений, формируемого при смешивании переданного и отраженного сигналов.

## Материал и методы

В качестве экспериментальной платформы использовалась программно-определяемая радиосистема USRP B200, работающая в диапазоне 5–6 ГГц и оснащенная логопериодической антенной (Рис.1). Управление аппаратной частью, формирование зондирующих сигналов и цифровая обработка осуществлялись в среде GNU Radio под управлением операционной системы Linux. Частота дискретизации составляла 10 МГц, центральная частота – 5,9 ГГц коэффициент децимации – 8.



Рисунок 1. Подключение системы.

Зондирующий сигнал формировался в виде линейно-частотно модулированного сигнала с полосой перестройки 5 МГц и начальным смещением –2,5 МГц. Длительности участков СВ, восходящего и нисходящего свипов задавались числом отсчетов 16 384, что при частоте дискретизации 10 МГц соот-

ветствует длительности каждого участка около 1,64 мс. Частотное разрешение составляло около 610 Гц. Передающий и приемный тракты конфигурировались программно с возможностью регулировки коэффициентов усиления (TX  $\approx$  10 дБ, RX  $\approx$  30 дБ) и компенсации аппаратной задержки.

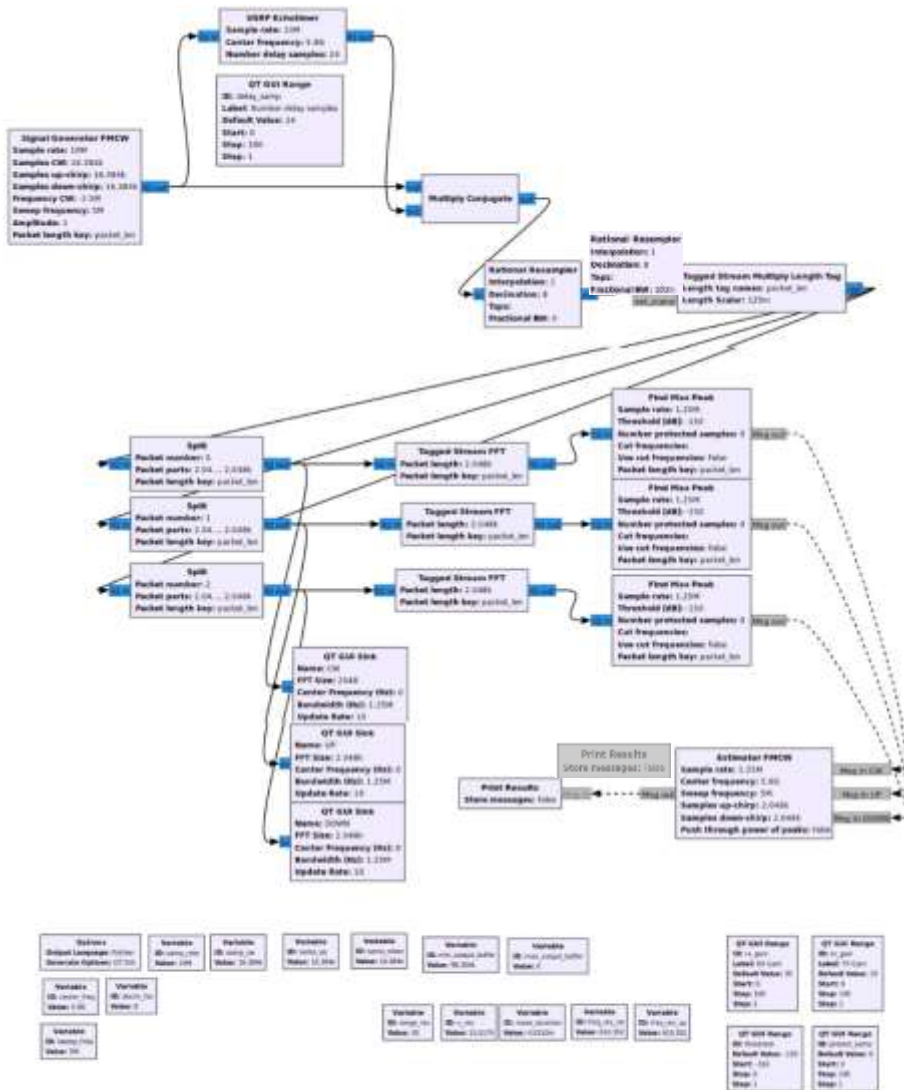


Рисунок 2. Структурно-функциональная блок-схема FMCW в среде GNU Radio.

Функциональная структура измерительного тракта и параметры обработки представлены на структурной схеме GNU Radio (Рис. 2). После приема сигнал

подвергался когерентному перемножению с опорной копией, децимации, сегментации потока на участки CW, UP и DOWN, а также спектральному анализу методом БПФ с длиной окна 2048 отсчетов. Обнаружение отраженных компонент выполнялось автоматическим поиском максимальных спектральных пиков с порогом  $-150$  дБ. Визуализация спектров и временных зависимостей выполнялась в реальном времени средствами графического интерфейса Qt.

Примененная методика обеспечила воспроизводимость измерений и получение экспериментальных данных, достаточную точность для анализа функциональных характеристик исследуемой радиолокационной конфигурации.

## Результаты

В ходе экспериментальной отладки программно-определяемой FMCW-схемы была проведена спектральная оценка принимаемого сигнала с использованием временных, частотных и водопадных представлений. Анализ выполнялся при размере БПФ 2048 и эффективной полосе наблюдения порядка  $\pm 0.3$  МГц.

По данным спектрального отображения (Рис. 3) значения “Max Hold” и “Min Hold” составляют приблизительно  $-60$  дБ и  $-100$  дБ соответственно, что указывает на различие уровней спектра в рассматриваемой экспериментальной конфигурации. Таким образом, эффективный динамический диапазон приема достигает приблизительно  $40$  дБ, что подтверждает достаточную чувствительность приемного тракта для регистрации слабых отраженных сигналов.

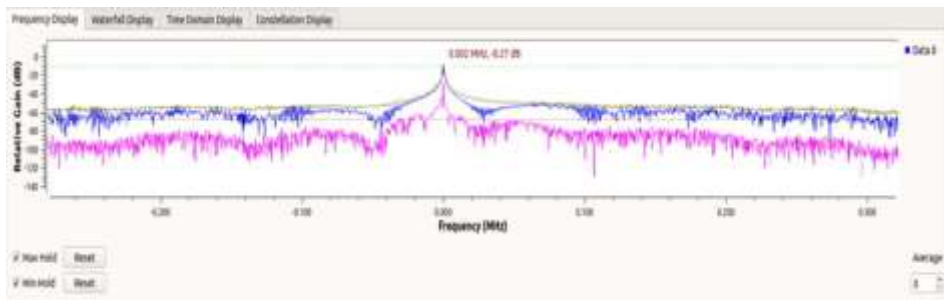


Рисунок 3. Частотное представление принятого сигнала с отображением Max Hold и Min Hold.

Амплитуда основного спектрального пика (Рис. 4) в ходе эксперимента изменялась в диапазоне от  $-30$  дБ до  $-8$  дБ (вариация порядка  $22$  дБ), что обусловлено изменением условий отражения и положением объекта вблизи антенного модуля. При программном изменении параметра задержки (number delay samples) наблюдалось систематическое смещение спектрального пика, что подтверждает корректность формирования и обработки частотного биения в реализованной FMCW-цепочке.



Рисунок 4. Амплитуды основных спектральных пик.

Водопадное (“Waterfall display”) представление спектра (Рис. 5) использовалось для качественной оценки временной динамики сигнала. При приближении отражающего объекта фиксировалось локальное увеличение спектральной интенсивности, а при его движении – характерные временные флуктуации, связанные с доплеровскими компонентами.

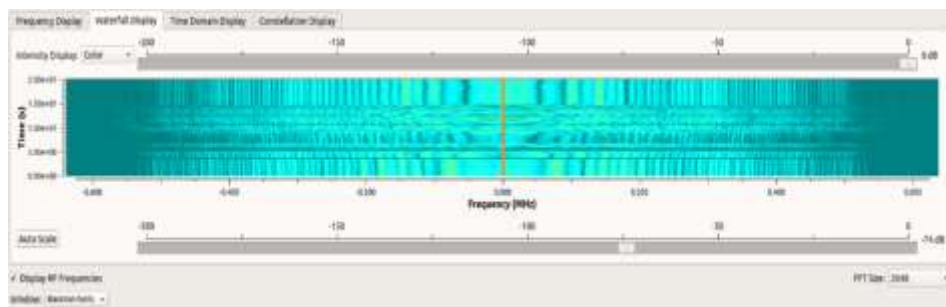


Рисунок 5. Водопадное представление спектра.

В ходе эксперимента программная реализация FMCW-алгоритма формировала численные оценки дальности и скорости на основе частот биений. Следует отметить, что полученные численные значения не могут рассматриваться как абсолютные физические величины, поскольку на них влияют несколько факторов: точность калибровки скорости изменения частоты, параметры усилительного тракта (коэффициенты усиления, линейность), а также наличие паразитных связей между приемным и передающим каналами. Поэтому данные оценки использовались преимущественно для качественного анализа динамики сигнала и проверки работы алгоритма. Данные оценки использовались исключительно для качественной верификации работоспособности алгоритма и анализа динамики отраженного сигнала.

## Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение программно-определяемых радиосистем обеспечивает широкие возможности. В ходе экспериментов была зафиксирована разница уровней пиков порядка 22 dB, что подтвердило работоспособность реализованного алгоритма обработки и чувствительность системы к изменениям энергетических характеристик отраженного сигнала. Полученные результаты демонстрируют эффективность использования платформ GNU Radio и USRP как универсальной экспериментальной среды для исследования FMCW-радиолокационных методов и их последующего применения в системах ближнего радиолокационного действия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Sundaresan S. et al.* Real time implementation of FMCW radar for target detection using GNU radio and USRP // 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). IEEE, 2015. PP. 1530–1534.
2. *Jankiraman M.* FMCW radar design. USA: “Artech House”, 2018.
3. *Komarov I., Smolskiy S.* Fundamentals of short-range FM radar. USA: “Artech House”, 2003.
4. *Lin J. et al.* Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application // Germany: “SpringerPlus”. Т. 5, № 1, 2016. P. 42.
5. *Marshall H., Koh G.* FMCW radars for snow research // Netherlands: “Cold Regions Science and Technology”. Т. 52, № 2, 2008. PP. 118–131.
6. *Veneruso P. et al.* FMCW Radar-Aided Navigation for Unmanned Aircraft Approach and Landing in AAM Scenarios: System Requirements and Processing Pipeline // Basel: “Sensors”. Т. 25, № 8, 2025. P. 2429.

## RESEARCH AND MODELING OF FREQUENCY-MODULATED CONTINUOUS WAVES (LFM, FMCW) IN SOFTWARE-DEFINED RADIO SYSTEMS BASED ON OPEN TOOLS

*E. Sivolenko, M. Pinamyan, B. Hovhannisyan*  
*Russian-Armenian University*

## ABSTRACT

This paper examines frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radar technology, which is widely used in modern measurement radar systems. The primary focus is on the software implementation of an FMCW radar using a software-defined radio (SDR) platform based on USRP hardware and the GNU Radio development environment.

The objective of the study is to obtain a functional implementation of an FMCW radar using the block-based architecture of GNU Radio and to experimentally validate its principal radar performance characteristics. FMCW signal generation, reflected signal modeling, and digital signal processing are implemented in this work. The experimental investigation is aimed at analyzing the spectral characteristics of the processed signals. It is shown that the software-defined approach provides high flexibility in configuring the parameters of the LFM (chirp) signal and enables efficient investigation of the influence of bandwidth, frequency sweep duration,

and sampling rate on measurement results. The obtained results confirm the applicability of GNU Radio and USRP as a universal experimental platform for the study of FMCW radar systems and can be used in the development of automotive radars, collision avoidance systems, and other short-range radar applications.

**Keywords:** Software-defined radio (SDR), functional principles of radar technologies, GNU Radio, digital signal processing (DSP).