

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ ՆԱԻՐԱ ՅՈՒՐԻԿԻ

**ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՇՂԹԱՆԵՐԻ ՈՉ ԳԾԱՅՆՈՒԹՅԱՆ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ CS DSB ԱԶԳԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՄԻՋՈՑՈՎ**

Ե.12.03 - «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА РА

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ГАСПАРЯН НАИРА ЮРИКОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CS DSB-СИГНАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.03 – «Телекоммуникационные сети, устройства и системы»

ЕРЕВАН 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝ Ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆեսոր, ԳԱԱ թղթակից անդամ Արսեն
Ալեքսանդրի Հախումյան
Պաշտոնական տ.գ.դ., պրոֆեսոր Վահան Հենրիխի Ավետիսյան,
ընդդիմախոսներ՝ Ֆ.-մ.գ.թ., դոցենտ Արմեն Հովհաննեսի Մակարյան
Առաջատար Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական
կազմակերպություն՝ ինստիտուտ
Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. սեպտեմբերի 4-ին,
ժամը 14:30-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046
Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17
մասնաշենք):
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական համալսարանի գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. օգոստոսի 3-ին:
046 մասնագիտական Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան
խորհրդի
Գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете
Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент НАН РА
Арсен Александрович Ахумян
Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Ваан Генрихович Аветисян,
к.ф.-м.н., доцент Армен Оганесович Макарян
Ведущая организация: Ереванский научно-исследовательский институт
средств связи

Защита диссертации состоится 4-го сентября 2026 г. В 14:30 ч. на заседании
Специализированного совета 046 – «Радиотехники и электроники»,
действующего при Национальном политехническом университете Армении, по
адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 3-го августа 2026 г.

Ученый секретарь

Специализированного
совета 046 к.т.н.



Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В современных радиокommunikационных и телекоммуникационных системах качество передачи сигналов в значительной степени определяется линейностью приемного и передающего трактов. Использование высокочувствительных приемников, широкополосных сигналов, развитие систем связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также широкое внедрение технологий программно-конфигурируемого радио (Software Defined Radio, SDR) приводят к ситуациям, когда даже незначительные проявления нелинейности способны вызывать интермодуляционные составляющие, побочные спектральные компоненты и искажения полезного сигнала.

Сигналы типа CS-DSB являются эффективным средством исследования подобных явлений, поскольку их спектральная структура позволяет анализировать взаимодействие несущей и боковых полос, оценивать влияние нелинейностей второго и третьего порядков, а также определять параметры, характеризующие динамический диапазон приемника. Такой подход приобретает особую актуальность при анализе работы приемных устройств в условиях плотной электромагнитной обстановки.

Актуальность работы также обусловлена совместным использованием программной среды LabVIEW и платформ SDR/USRP. Данные средства обеспечивают возможность создания контролируемой экспериментальной среды, программной генерации сигналов, выполнения спектрального анализа и экспериментального исследования реального радиочастотного тракта без необходимости разработки сложных и дорогостоящих аппаратных комплексов.

Основная цель исследования и решенные задачи

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методики оценки нелинейности электронных цепей на основе CS-DSB сигналов с использованием методов спектрального анализа высших порядков, моделирования в среде LabVIEW и экспериментальной платформы SDR.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. исследованы особенности модуляции и демодуляции сигналов DSB и CS-DSB, их спектральная структура и требования к полосе пропускания;

2. проанализированы нелинейные модели электронных цепей и механизмы возникновения интермодуляционных искажений;
3. разработана методика количественной оценки нелинейности электронных цепей с использованием двухтоновых и CS-DSB-сигналов.
4. реализованы программные модели генерации сигналов, квадратичных и кубических преобразований, а также спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье (FFT) в среде LabVIEW;
5. создан экспериментальный стенд на базе платформы SDR/USRP и исследовано влияние сигналов на приемопередающий тракт системы связи беспилотного летательного аппарата (ВПЛА);
6. выполнена оценка влияния внешнего модулированного сигнала, а также составляющих второго и третьего порядков на чувствительность, избирательность и динамический диапазон приемника.

Объект, предмет и методы исследования

Объектом исследования является приемный тракт электронных и радиочастотных цепей, в частности участки приемопередающей системы связи беспилотного летательного аппарата (ВПЛА), в которых могут проявляться нелинейные преобразования.

Предметом исследования являются процессы возникновения, оценки и экспериментального подтверждения нелинейности и интермодуляционных искажений с использованием CS-DSB-сигналов.

В работе использованы методы спектрального анализа высших порядков, преобразования Фурье, двухтонового тестирования, моделирования нелинейности на основе рядов Тейлора, программного моделирования в среде LabVIEW, генерации сигналов с использованием платформы SDR, а также экспериментальных спектральных измерений.

Научная новизна работы

- Предложена методика оценки нелинейности электронных цепей на основе CS-DSB-сигналов, объединяющая теоретическое моделирование, программную реализацию и экспериментальные исследования с использованием платформы SDR.

- Показано, что квадратичные и кубические преобразования CS-DSB-сигналов могут эффективно использоваться для выявления влияния нелинейностей второго и третьего порядков соответственно.
- Разработана структура генерации сигналов и их спектральной оценки в среде LabVIEW, обеспечивающая моделирование нелинейных режимов работы приемника и оценку интермодуляционных составляющих.
- Экспериментально подтверждено, что воздействие внешнего сигнала, сформированного с использованием платформы USRP, приводит к изменению спектрального отклика приемника, вызывая локальную перегрузку, повышение уровня шумового фона и ограничение динамического диапазона.

Практическая значимость работы

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании телекоммуникационных и радиоэлектронных систем, оценке линейности приемных устройств, повышении помехоустойчивости каналов связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также при организации лабораторных исследований на основе технологий SDR. Разработанный подход позволяет на ранних этапах оценивать возможную перегрузку приемника, снижение его избирательности и вероятность возникновения интермодуляционных помех.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение CS-DSB-сигналов позволяет выявлять нелинейные преобразования в электронных цепях в контролируемых условиях.
2. Моделирование нелинейностей второго и третьего порядков с использованием квадратичных и кубических членов обеспечивает наглядную и достоверную оценку интермодуляционных составляющих.
3. Совместное использование среды LabVIEW и платформ SDR/USRP представляет собой эффективную экспериментальную среду для исследования линейности приемников и их устойчивости к помехам.
4. Для приемников беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) внешние модулированные сигналы могут вызывать изменение спектральной структуры, повышение уровня шумового фона и снижение практической чувствительности приемника.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на научных семинарах, международных научных конференциях по телекоммуникациям и

радиофизике, а также отражены в профильных научных изданиях по тематике исследования.

Основные результаты диссертации были представлены на следующих международных научных конференциях:

- International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and Optoelectronics (IRPhE 2024), Yerevan, Armenia, 2024,
- 2025 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech-2025), Saint Petersburg, Russia, 2025.

Достоверность научных результатов

Достоверность научных результатов подтверждается представленными в диссертации теоретическими и математическими обоснованиями, результатами моделирования в программной среде LabVIEW, экспериментальными исследованиями, выполненными с использованием платформы SDR/USRP, и их подтверждением в ходе испытаний на реальном приеме-передающем тракте системы связи беспилотного летательного аппарата.

Внедрение

- Разработанная методология исследования нелинейности электронных цепей с использованием CS-DSB-сигналов внедрена в закрытом акционерном обществе «Advanced Technologies Group» (ATG), где применяется при проведении научно-исследовательских работ, связанных с исследованием и экспериментальной оценкой нелинейных характеристик электронных модулей и устройств, а также с анализом гармонических и интермодуляционных составляющих.
- Результаты диссертационной работы внедрены в обществе с ограниченной ответственностью «Integra Technologies International», где используются при выполнении научно-исследовательских работ по исследованию нелинейных характеристик электронных устройств. На основе полученных результатов планируется последующее патентование разработанного технического решения в США.

Публикации

Основные положения диссертации представлены в девяти (9) научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 120 наименований, и четырех приложений. Общий объем диссертации составляет 142 страницы. Работа содержит 46 рисунков, 76 формул и одну таблицу. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, представлены используемые методы, научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту.

Показано, что ключевой идеей диссертационной работы является исследование нелинейных явлений с использованием CS-DSB-сигналов — от теоретического анализа до экспериментальных исследований.

Глава 1. Спектральный анализ высших порядков

Первая глава посвящена теоретическим основам модулированных сигналов, нелинейных электронных цепей и интермодуляционных искажений. Рассматривается модуляция с двумя боковыми полосами (DSB), при которой передаваемый сигнал умножается на несущее колебание, а содержащаяся в нем информация переносится в две боковые полосы, расположенные симметрично относительно частоты несущей (рис. 1).

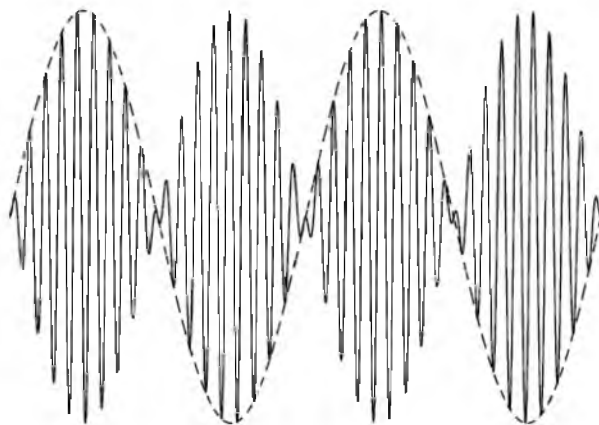


Рис. 1. Временная форма DSB-модулированного несущего сигнала.

В случае CS-DSB несущая составляющая подавляется, а энергия передаваемого сигнала концентрируется в боковых полосах (рис.2). Такой подход повышает энергетическую эффективность системы и одновременно обеспечивает более наглядное исследование поведения боковых полос. В главе представлены основные соотношения, описывающие процессы модуляции и демодуляции, а также проанализировано влияние фазового рассогласования на результат демодуляции.

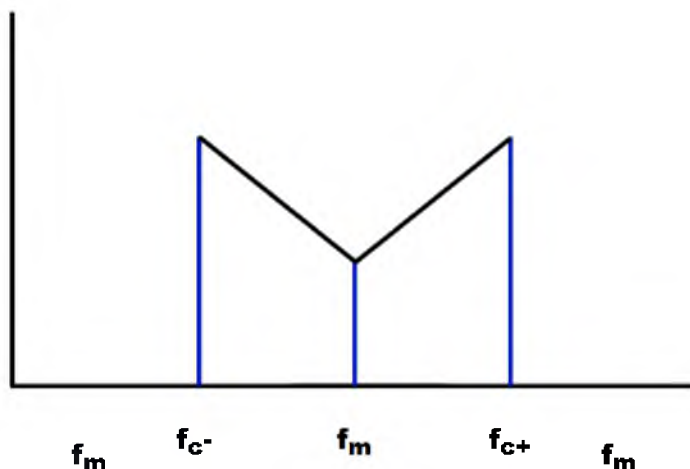


Рис. 2. Общий вид спектральной структуры CS-DSB-сигнала.

Для анализа нелинейных электронных цепей применяется аппроксимация с использованием ряда Тейлора. При воздействии однотонового входного сигнала возникают гармонические составляющие, тогда как при двух тоновом воздействии формируются интермодуляционные составляющие. Особое внимание уделяется составляющим третьего порядка, поскольку они, как правило, располагаются вблизи рабочей полосы полезного сигнала и с трудом подавляются традиционными методами фильтрации.

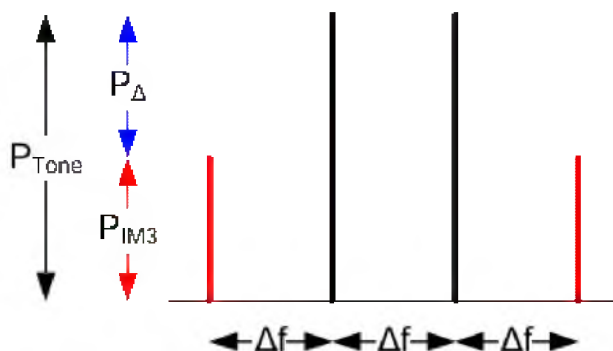


Рис. 3. Спектральная картина двухтонового IMD-теста.

Для количественной оценки интермодуляционных искажений рассматриваются показатели IMD, IP3 и динамического диапазона. При проведении двухтонового испытания на вход исследуемой цепи подаются два сигнала с близкими частотами,

а на выходе измеряются уровни основных тонов и интермодуляционных продуктов (рис. 3). Полученные соотношения позволяют оценить пределы линейности исследуемой цепи.

В главе также рассматриваются интермодуляционные явления, возникающие внутри анализаторов спектра. Показано, что результаты измерений могут ограничиваться не только характеристиками исследуемого устройства, но и собственным шумом измерительного прибора, линейностью входного смесителя, а также особенностями тракта промежуточной частоты (IF) и полосы разрешения (RBW).

Глава 2. Формирование и применение CS-DSB-сигналов

Во второй главе представлена методология формирования CS-DSB-сигналов и их применения для исследования нелинейных электронных цепей. Показано, что управляемая спектральная структура модулированного сигнала позволяет получать опорные результаты измерений, а затем последовательно вводить нелинейные составляющие и анализировать их влияние на функционирование всей системы (рис. 4).

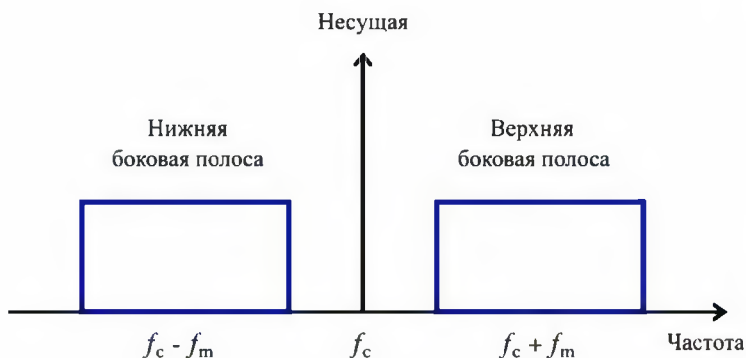


Рис. 4. Структура боковых полос при подавленной несущей.

В главе рассматриваются комбинации двух тоновых и модулированных сигналов, которые могут использоваться для оценки чувствительности, избирательности и устойчивости приемника к интермодуляционным искажениям. Использование CS-DSB-сигнала позволяет формировать спектральные

составляющие, расположенные вблизи несущей частоты, и оценивать, попадают ли они в рабочую полосу пропускания приемника или в соседние частотные полосы.

Особое внимание уделено квадратичному и кубическому преобразованиям сигнала. Квадратичные члены моделируют нелинейности второго порядка, приводящие к возникновению постоянной составляющей, гармоник удвоенной частоты и комбинационных частот. Кубические члены описывают нелинейности третьего порядка, представляющие наибольшую практическую опасность, поскольку возникающие интермодуляционные составляющие могут располагаться в непосредственной близости от полезного сигнала.

Для программной реализации используется среда LabVIEW (рис. 5). Генерация сигналов осуществляется с помощью синусоидальных источников и математических блоков умножения, а спектральный анализ выполняется с использованием инструментов быстрого преобразования Фурье (FFT). Такая структура позволяет в рамках единой программной среды формировать входной сигнал, моделировать нелинейные составляющие и анализировать выходной спектр.

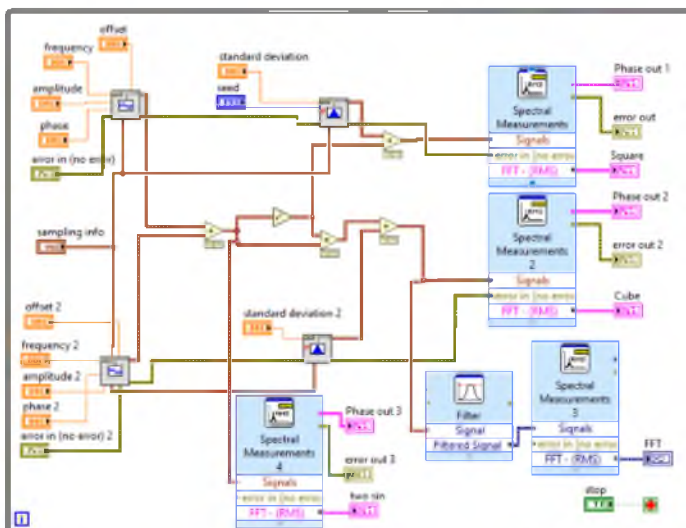


Рис. 5. Пример моделирования сигналов в среде LabVIEW.

Данная глава формирует теоретическую и программную основу для последующих экспериментальных исследований. Разработанные модели используются в третьей главе при проведении экспериментов с реальными

сигналами SDR/USRP, а также при исследовании приемопередающей системы беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Глава 3. Экспериментальная среда и анализ результатов

В третьей главе представлена экспериментальная система, построенная на основе программной среды LabVIEW, источника сигналов SDR/USRP и приемопередающей системы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (рис. 6). Цель экспериментальных исследований заключается в формировании CS-DSB-сигналов в контролируемых условиях и изучении их влияния на спектральный отклик приемника.

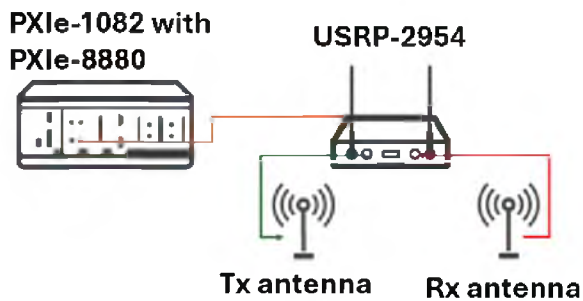


Рис. 6. Экспериментальная установка на базе PXIe-1082 и USRP-2954.

В экспериментальной среде система исследуется в нескольких режимах: без внешнего воздействия SDR, при воздействии сигнала, сформированного с помощью USRP, в условиях изолированного канала связи, а также при квадратичном и кубическом нелинейных преобразованиях (рис. 7). Такой поэтапный подход позволяет разделить собственные шумовые и нелинейные проявления системы и эффекты, обусловленные воздействием внешнего сигнала.

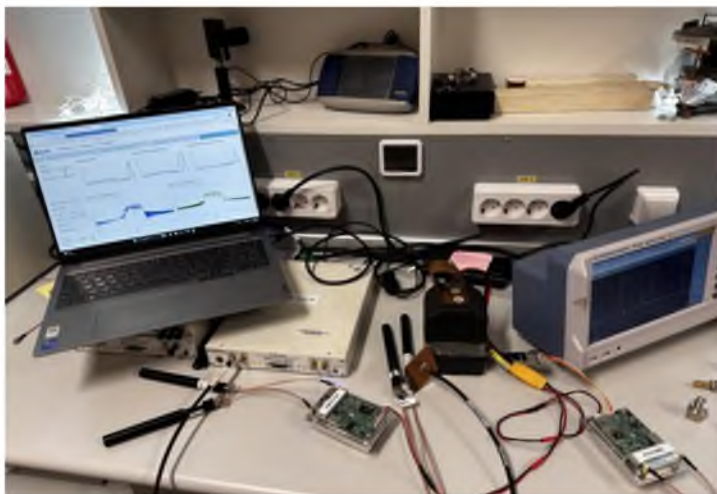


Рис. 7. Общий вид лабораторного экспериментального стенда.

Базовые измерения, выполненные без воздействия USRP, отражают естественный спектральный отклик системы (рис. 8). При этом сохраняется периодическая структура спектра, а наблюдаемые незначительные колебания обусловлены собственными шумами приемника, особенностями усилительного тракта и ограниченными проявлениями внутренних нелинейностей.

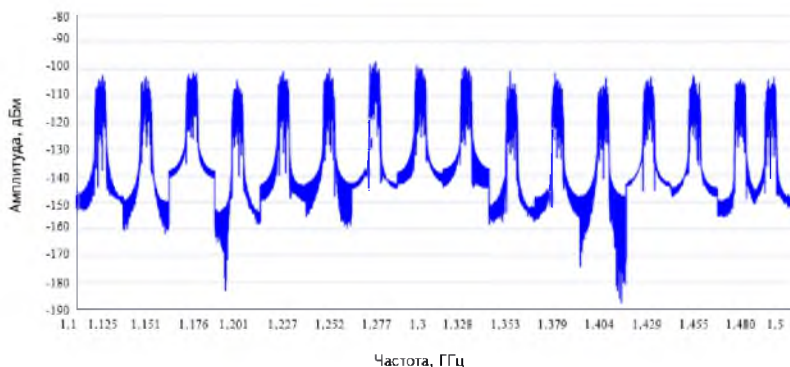


Рис. 8. Пример спектрального отклика системы при отсутствии внешнего воздействия.

При воздействии сигнала, сформированного с помощью USRP, в тех же частотных каналах наблюдаются увеличение амплитудных отклонений, появление локальных выраженных пиков и усиление асимметрии спектра (рис. 9). Это свидетельствует о взаимодействии внешнего модулированного сигнала с нелинейными узлами приемника. Такое воздействие может приводить к снижению избирательности приемника и ограничению его динамического диапазона.

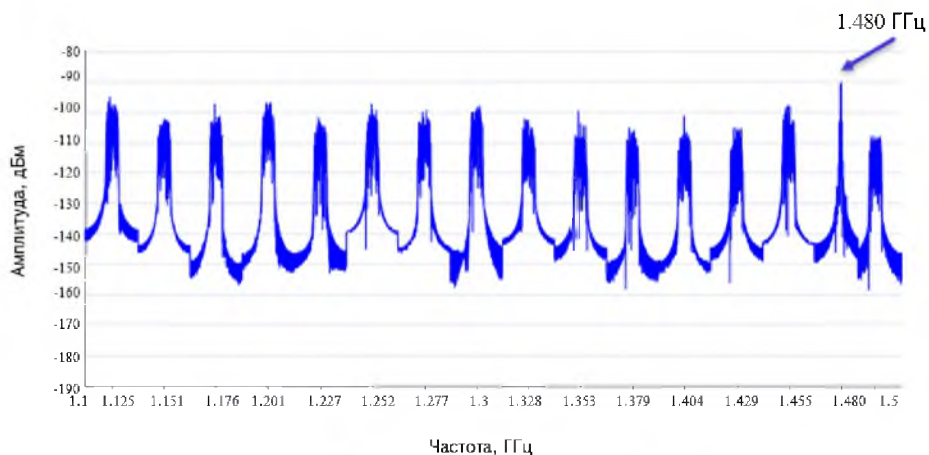


Рис. 9. Усиление центральной части спектра под воздействием сигнала USRP.

Исследования изолированного канала связи показывают, что даже при отсутствии соседних каналов внешний сигнал SDR способен изменять спектральную структуру приемника. При отсутствии внешнего воздействия спектр остается относительно гладким и сосредоточенным в определенном частотном диапазоне, тогда как при воздействии сигнала USRP центральный пик становится более узким, выраженным и характеризуется повышенным уровнем шумовых неоднородностей.

При квадратичном преобразовании в спектре формируются составляющие второго порядка: постоянная составляющая, гармоники удвоенной частоты и комбинационные линии. Эти компоненты могут попадать в соседние полосы частот, увеличивая шумовой фон приемника. Экспериментальные результаты показывают, что квадратично преобразованный CS-DSB-сигнал приводит к увеличению концентрации энергии вблизи центральной частоты и снижению эффективной избирательности приемника (рис. 10).

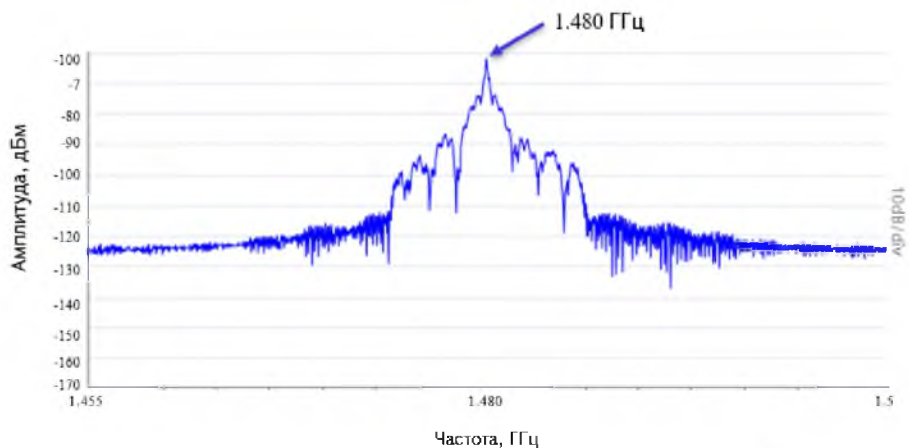


Рис. 10. Спектральная структура, сформированная под воздействием квадратичной нелинейности.

При кубическом преобразовании проявляются интермодуляционные составляющие третьего порядка, расположенные наиболее близко к рабочим частотам. Они с трудом подавляются стандартными фильтрами приемника и могут восприниматься как искаженные компоненты полезного сигнала либо как дополнительные мешающие сигналы. По этой причине нелинейности третьего порядка рассматриваются как один из основных факторов, ограничивающих чувствительность и помехоустойчивость приемников беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

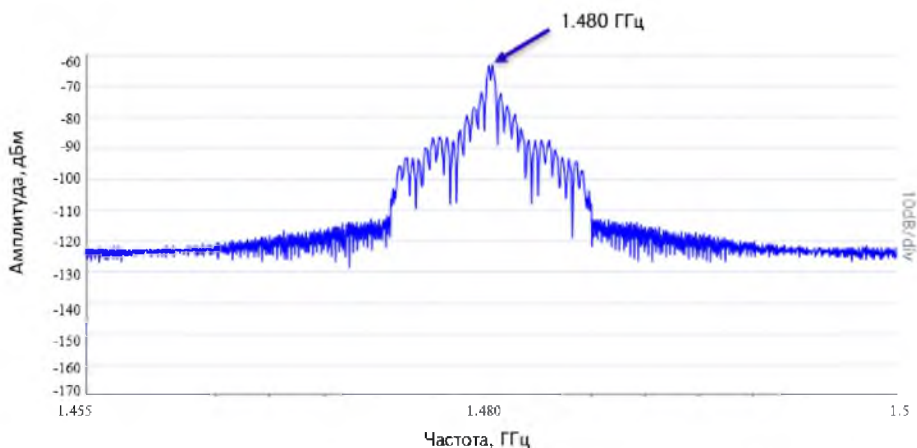


Рис. 11. Рост интермодуляционных составляющих при кубической нелинейности.

Результаты, представленные в третьей главе, подтверждают, что сочетание технологий LabVIEW и SDR/USRP позволяет проводить контролируемые экспериментальные исследования нелинейных явлений, получать спектральные характеристики, соответствующие теоретической модели, и оценивать изменение режима работы приемника в условиях воздействия внешнего модулированного сигнала (рис. 11).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Проведен теоретический анализ DSB и CS-DSB-сигналов и показано, что структура их боковых полос является эффективным инструментом для исследования нелинейности электронных цепей [1, 3, 8].
2. Показано, что нелинейная модель, основанная на разложении в ряд Тейлора, позволяет объяснить возникновение гармонических и интермодуляционных составляющих, а также выделить эффекты нелинейностей второго и третьего порядков [1, 4, 8].
3. Установлено, что двухтоновые и CS-DSB-испытания могут применяться для оценки линейности приемников, уровня интермодуляционных искажений (IMD), точки пересечения третьего порядка (IP3) и динамического диапазона [1, 4, 8].
4. Разработанные в среде LabVIEW модели обеспечивают генерацию необходимых сигналов, моделирование квадратичных и кубических нелинейностей, а также выполнение спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье (FFT) [3, 5, 7].
5. На базе платформы SDR/USRP создан экспериментальный стенд, позволяющий в контролируемых условиях исследовать отклик приемопередающей системы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при воздействии внешнего модулированного сигнала [5, 7, 9].
6. Экспериментальные результаты показывают, что сигнал, сформированный с помощью USRP, может вызывать усиление центральной части спектра, увеличение локальных пиков, повышение уровня шумового фона и снижение эффективной избирательности приемника [4, 7, 9].
7. Установлено, что квадратичное преобразование CS-DSB-сигнала преимущественно характеризует влияние нелинейностей второго порядка, тогда как кубическое преобразование приводит к возникновению интермодуляционных составляющих третьего порядка, представляющих наибольшую опасность вследствие их расположения вблизи рабочей полосы частот [1, 2, 6, 8, 9].
8. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании телекоммуникационных приемников, предварительных испытаниях радиочастотных трактов, повышении помехоустойчивости каналов связи беспилотных летательных аппаратов, а также при организации учебных и научно-исследовательских лабораторных работ [1–9].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Naira Gasparyan**, Arsen Hakhoumian, Eduard Sivolenko, Mane Barseghyan SC-DSB signal as a probe signal for testing nonlinearity in electronic circuits // IET conference proceedings, Vol. 2024, Issue 36, pp. 75–78.
2. Eduard Sivolenko, Arsen Hakhoumian, **Naira Gasparyan**, Mane Barseghyan, Hakob Babayan More accurate and effective monitoring of moving targets in complex environments using “spectral mask” for harmonic signatures using higher-ordered statistics // IET conference proceedings, Vol. 2024, Issue 36, pp. 49–52.
3. A. Hakhoumian, M. Barseghyan, **N. Gasparyan**, B. Hovhannisyan, E. Sivolenko Analysis of Harmonic Signals in Non-Real Time of Moving Targets in Complex Environments Using Higher-Order Statistics in LabVIEW // Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2024, Vol. 59, N 4, pp. 408–412.
4. **N.Y. Gasparyan**, A.A. Hakhoumian, E.R. Sivolenko Hybrid Bispectrum-Waterfall Features Extraction with CS-DSB for RF Receiver // Armenian Journal of Physics, 2025, Vol. 18, Issue 3, pp. 43–47.
5. **Naira Gasparyan** Bispectral Analysis as a Diagnostic Tool for Nonlinearities in RF Signal Transmission Using a Modular USRP-LabVIEW Framework // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech), 2025, pp. 192–194.
6. Eduard Sivolenko, Mane Harutyunyan, Sergey Makarov, **Naira Gasparyan**, Hayk Martirosyan, Arsen Hakhoumian Bispectrum-Based Signal Processing Using Waterfall Features // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech), 2025, pp. 175–177.
7. **N.Y. Gasparyan** Simulation and Degradation Analysis of UAV Command Signals using SC-DSB Modulation in LabVIEW // Armenian Journal of Physics, 2025, Vol. 18, Issue 4, pp. 72–76.
8. A.A. Hakhoumian, **N.Y. Gasparyan**, M.A. Barseghyan SC-DSB-Based Characterization of RF Circuit Nonlinearity Using IP2 and IP3 Metrics // Proceedings of NPUA: Information Technologies, Electronics, Radio Engineering, 2026, № 1, pp. 110–119.
9. A.A. Ахумян, **Н.Ю. Гаспарян**, Э.Р. Сиволенко, Б.А. Оганисян Влияние SC-DSB-сигналов на чувствительность и селективность приемника БПЛА с использованием LabVIEW // Известия НАН Армении, Физика, 2026, т. 61, № 2, с. 293–299.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենախոսությունը նվիրված է էլեկտրոնային և ռադիոհաճախականային շղթաների ոչ գծային հատկությունների ուսումնասիրությանը՝ ճնշված կրողով երկկողմ հաճախականային շերտով (CS-DSB) ազդանշանների կիրառմամբ: Հետազոտության արդիականությունը պայմանավորված է ժամանակակից հեռահաղորդակցական համակարգերի ընդունող-հաղորդող տրակտների գծայնության նկատմամբ աճող պահանջներով, ծրագրային սահմանվող ռադիոյի (SDR) տեխնոլոգիաների լայն կիրառմամբ, ինչպես նաև անօդաչու թռչող սարքերի (ԱԹՍ) կապի համակարգերի զգայունության, ընտրողականության և խանգարողիմացկունության ապահովման անհրաժեշտությամբ:

Աշխատանքի նպատակն է մշակել և փորձարարական եղանակով ուսումնասիրել էլեկտրոնային շղթաների ոչ գծայնության գնահատման մեթոդաբանություն՝ հիմնված CS-DSB ազդանշանների, բարձր կարգի սպեկտրալ վերլուծության, LabVIEW ծրագրային միջավայրում իրականացված մոդելավորման և SDR/USRP ապարատային հարթակի կիրառման վրա:

Աշխատանքում իրականացվել է DSB և CS-DSB ազդանշանների տեսական վերլուծություն, ուսումնասիրվել են դրանց ձևավորման, դեմոդուլյացիայի և սպեկտրալ կառուցվածքի առանձնահատկությունները: Էլեկտրոնային շղթաների ոչ գծային հատկությունները նկարագրվել են փոխանցման բնութագրի Թեյլորի շարքով մոտարկման միջոցով: Յուրաքանչյուր տրվել, որ մոդելի քառակուսային և խորանարդային անդամները հնարավորություն են տալիս համապատասխանաբար ուսումնասիրել երկրորդ և երրորդ կարգի ոչ գծայնությունները, ինչպես նաև հարմոնիկ և միջմոդուլյացիոն աղավաղումները: Գծայնության քանակական գնահատման նպատակով դիտարկվել են երկտոնային փորձարկման մեթոդը, միջմոդուլյացիոն աղավաղումների (IMD) մակարդակը, երկրորդ և երրորդ կարգերի հատման կետերը (IP2 և IP3), ինչպես նաև ընդունիչի դինամիկական տիրույթը:

LabVIEW ծրագրային միջավայրում մշակվել են CS-DSB ազդանշանների գեներացման, դրանց քառակուսային և խորանարդային փոխակերպման, ինչպես նաև արագ Ֆուրյեի ձևափոխման (FFT) հիման վրա սպեկտրային վերլուծության ծրագրային մոդելներ: Ստեղծվել է PXIe-1082, PXIe-8880 և USRP-2954 սարքավորումների հիման վրա կառուցված փորձարարական ստենդ, որը նախատեսված է արտաքին մոդուլացված ազդանշանի ազդեցության պայմաններում ԱԹՍ կապի համակարգի ընդունող-հաղորդող տրակտի հետազոտման համար:

Փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում հաստատվել է, որ USRP հարթակի միջոցով ձևավորված ազդանշանի ազդեցությունը հանգեցնում է ամպլիտուդային շեղումների մեծացման, սպեկտրում տեղային առավելագույնների առաջացման, աղմուկային ֆոնի բարձրացման և ընդունիչի արդյունավետ դինամիկական տիրույթի սահմանափակման: Ցույց է տրվել, որ CS-DSB ազդանշանի քառակուսային փոխակերպման արդյունքում ձևավորվում են երկրորդ կարգի բաղադրիչներ, ներառյալ հաստատուն բաղադրիչը, կրկնակի և կոմբինացիոն հաճախականությունները: Խորանարդային փոխակերպման դեպքում առաջանում են երրորդ կարգի միջմոդուլացիոն բաղադրիչներ, որոնք տեղակայված են աշխատանքային հաճախականային տիրույթին մոտ և առավել էական ազդեցություն են ունենում ընդունիչի զգայունության և ընտրողականության վրա:

Աշխատանքի գիտական նորույթը կայանում է էլեկտրոնային շղթաների ոչ գծայնության հետազոտման համալիր մեթոդաբանության մշակման մեջ, որը միավորում է տեսական մոդելավորումը, ծրագրային իրականացումը և SDR հարթակի վրա իրականացված փորձարարական չափումները՝ CS-DSB ազդանշանների կիրառմամբ: Ստացված արդյունքների գործնական նշանակությունը պայմանավորված է դրանց կիրառման հնարավորությամբ հեռահաղորդակցական ընդունիչների նախագծման և փորձարկման, ռադիոհաճախականային տրակտների գծայնության գնահատման, ԱԹՍ կապի համակարգերի խանգարողիմացկունության բարձրացման, ինչպես նաև ռադմանական և գիտահետազոտական լաբորատոր համալիրների կազմակերպման գործընթացներում:

NAIRA YURIK GASPARYAN
**INVESTIGATION OF ELECTRONIC CIRCUIT NON-LINEARITY USING CS-
DSB SIGNALS**
SUMMARY

The dissertation is devoted to the investigation of nonlinear properties of electronic and radio-frequency circuits using carrier-suppressed double-sideband signals, referred to as CS-DSB signals. The relevance of the research is determined by the increasingly stringent linearity requirements imposed on the transmitter and receiver paths of modern telecommunication systems, the widespread adoption of software-defined radio technologies, and the need to ensure the sensitivity, selectivity, and interference immunity of unmanned aerial vehicle communication links.

The aim of the dissertation is to develop and experimentally investigate a methodology for evaluating electronic-circuit nonlinearities using CS-DSB signals, higher-order spectral analysis, LabVIEW-based simulation, and an SDR/USRP experimental platform.

A theoretical analysis of DSB and CS-DSB signals has been carried out, including their generation, demodulation, spectral structure, and bandwidth characteristics. The nonlinear behavior of electronic circuits is described by approximating their transfer characteristics using a Taylor-series expansion. It is demonstrated that the quadratic and cubic terms of the model can be used to investigate second- and third-order nonlinearities, harmonic components, and intermodulation products. Two-tone testing, intermodulation distortion levels, second- and third-order intercept points, IP_2 and IP_3 , and receiver dynamic-range parameters are considered for the quantitative characterization of circuit linearity.

LabVIEW-based software models have been developed for CS-DSB signal generation, quadratic and cubic nonlinear transformation, and FFT-based spectral analysis. An experimental test bench incorporating PXIe-1082, PXIe-8880, and USRP-2954 equipment has been implemented to investigate the effect of an externally generated modulated signal on the transceiver path of a UAV communication system.

The experimental results demonstrate that a USRP-generated signal can increase amplitude deviations, produce local spectral peaks, raise the noise-floor level, and restrict the effective dynamic range of the receiver. The quadratic transformation of a CS-DSB signal generates second-order components, including a DC component, doubled-frequency components, and combination-frequency products. The cubic transformation

produces third-order intermodulation components located close to the operating frequency band. These components are difficult to suppress using conventional receiver filters and have the most significant effect on receiver sensitivity and selectivity.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of an integrated methodology for investigating electronic-circuit nonlinearities that combines theoretical modeling, software implementation, and experimental SDR measurements using CS-DSB signals. The practical significance of the results is related to their application in the design and testing of telecommunication receivers, preliminary evaluation of radio-frequency path linearity, improvement of UAV communication-link interference immunity, and development of educational and research laboratory systems.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G. Kuznetsov', is located in the lower right quadrant of the page.