

61-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2025 г.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Биюмен Е.А., Макареня Е.А., студенты гр. 361401

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

Фильченкова Т.М. – ст. преподаватель каф. ЗИ

Аннотация. Анализ процессов модуляции и демодуляции в системе телекоммуникаций представляет собой исследование, в ходе которого были рассмотрены методы формирования, модуляции и последующей демодуляции радиоимпульса с целью выделения исходной огибающей сигнала. В работе использовалась программная реализация на языке Python, позволяющая смоделировать как спектральное преобразование, так и воздействие различных фильтров, что критически важно для задач цифровой обработки сигналов в телекоммуникационных системах.

Ключевые слова. Амплитудная модуляция, демодуляция, Python, спектр сигнала, фильтр Чебышева, фильтр Баттерворта, быстрое преобразование Фурье.

Математическое моделирование позволяет провести исследование модуляции и демодуляции сигналов в системах телекоммуникаций. Этот метод относится к теоретическим и характеризуется следующими достоинствами: 1) не нужна практическая реализация устройств для их осуществления (это сокращает экономические затраты); 2) есть возможность имитировать разные условия работы исследуемых устройств систем телекоммуникаций (это позволяет произвести оценку качества и эффективность системы).

Цель данной научно-исследовательской работы: провести анализ процессов модуляции и демодуляции в системе телекоммуникаций посредством математического моделирования. Задачи данной работы: 1) провести теоретическое исследование процесса модуляции по схеме, представленной на рисунке 1; 2) выполнить математическое моделирование процесса демодуляции.

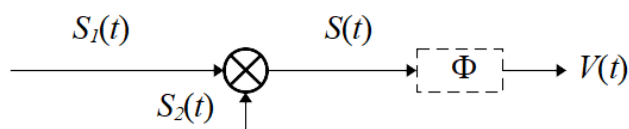


Рисунок 1 – Схема амплитудной модуляции

Исходные данные для моделирования:

– сигнал $S_1(t)$ – полезный информационный сигнал:

$$S_1(t) = \begin{cases} A, & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad 1)$$

где A – амплитуда радиоимпульса; T – период радиоимпульса.

– сигнал $S_2(t)$ – несущее колебание:

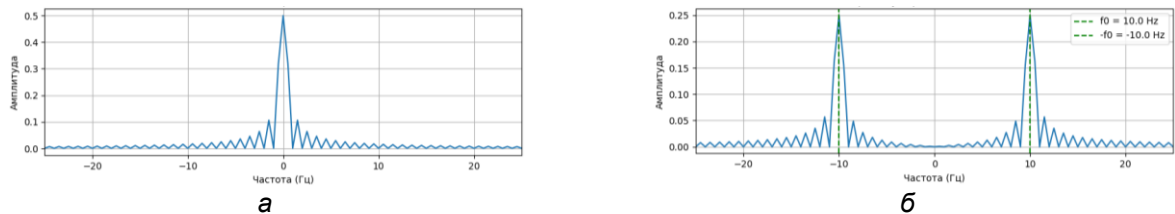
$$S_2(t) = \cos(2\pi f_0 t) \quad 2)$$

где f_0 – частота несущего колебания.

– выполнение условия $2f_0 \gg 1/T$,

- $f_0 = 10$ Гц (частота несущего сигнала);
- $A = 1$ В (амплитуда радиоимпульса);
- $T = 1$ с (период радиоимпульса);
- $f_s = 1000$ Гц (частота дискретизации, для преобразований Фурье).

Такой метод модуляции должен, согласно теории, приводить к расщеплению спектральной плотности импульса на две части, которые смещаются на частоты $\pm f_0$, что подтверждается полученной нами визуализацией спектров, построенных с помощи быстрого преобразования Фурье (FFT) (рисунок 2) [1].



а – спектр радиоимпульса $S_1(t)$; б – спектр модулированного сигнала $S(t)$;

Рисунок 2 – Схема амплитудной модуляции

Демодуляция осуществляется посредством повторного умножения модулированного сигнала на несущий сигнал, что приводит к появлению как полезной составляющей, так и па-разитных компонент (рисунок 3), их можно увидеть на частотах $2f_0$ (в нашем случае ± 20 Гц). Для восстановления исходного сигнала применяется фильтрация с помощью фильтров нижних частот.

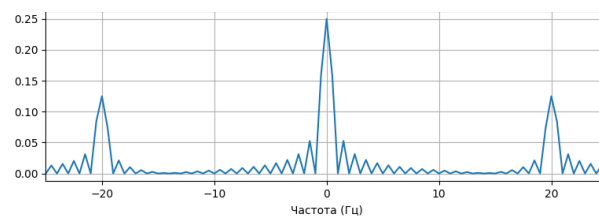


Рисунок 3 – Спектр сигнала после демодуляции

В работе были использованы два типа фильтров – фильтр Баттерворта и фильтр Чебышева первого рода – с порядком 4 и частотой среза, равной несущей f_0 , АЧХ фильтров представлены на рисунке 4.

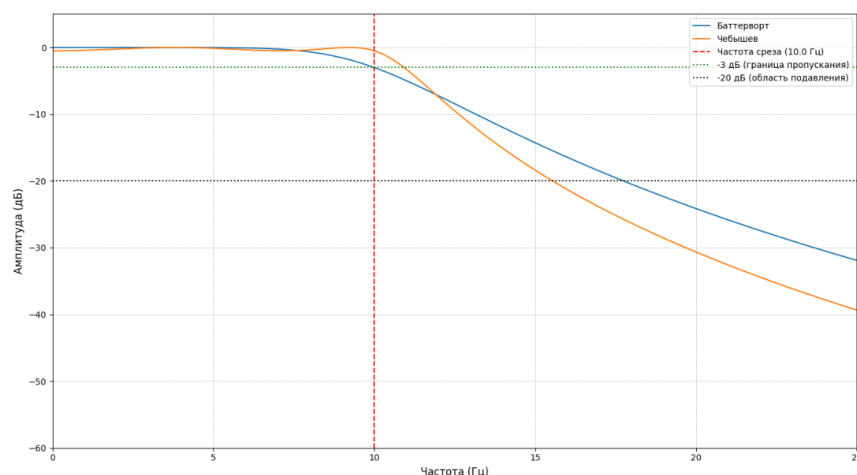
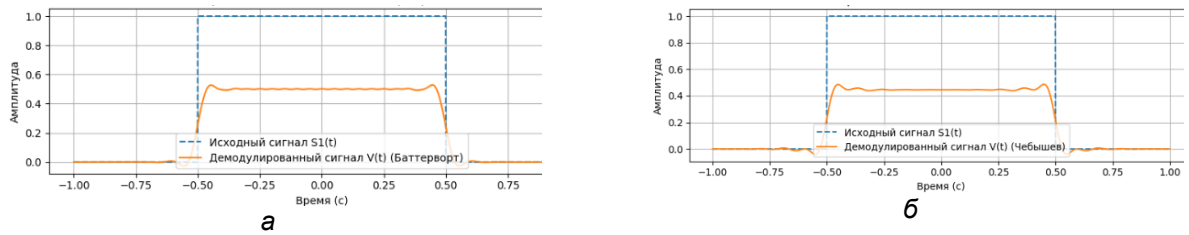


Рисунок 4 – АЧХ фильтров Баттерворта и Чебышева

Сигналы, полученные после демодуляции и фильтрации приведены на рисунке 5. Можно

заметить, что восстановленный сигнал после фильтра Чебышева имеет большую рябь, по сравнению с фильтрацией Баттерворта. Это явление напрямую связано с АЧХ фильтров (рисунок 4). На графике АЧХ фильтра Чебышева есть незначительные колебания до частоты среза. Этот вид фильтра оказывает меньшее подавление частот сразу после частоты среза.

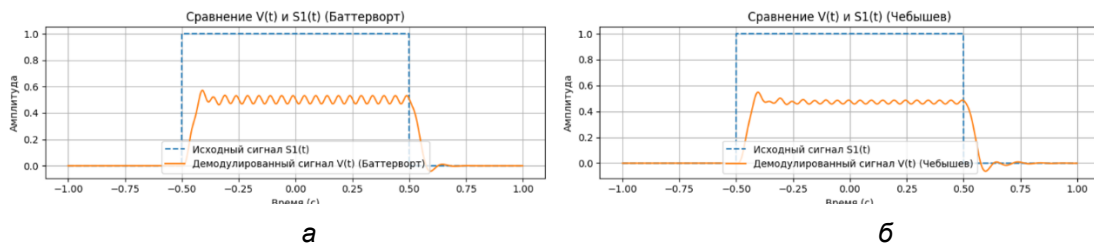


а – вид демодулированного сигнала с фильтром Баттерворта; б – вид демодулированного сигнала с фильтром Чебышева;

Рисунок 5 – Сигналы после демодуляции и фильтрации

В программной реализации все этапы – от формирования исходного прямоугольного импульса до вычисления спектральных плотностей и визуализации временных и частотных характеристик – были реализованы с использованием библиотеки NumPy и пакета matplotlib. Для анализа спектров использовалась быстрое преобразование Фурье (FFT), а вычисленные спектры корректно центрировались с помощью fftshift (построение спектра относительно нулевой частоты) [2].

Нами была установлена зависимость конечного результата демодуляции в случаях использования функций lfilter и filtfilt. Первый вариант даёт фазовые искажения, но отражает реалистичную работу системы, второй – устраняет сдвиг фазы и даёт более гладкий результат, что позволяет лучше сравнивать сигналы (до и после демодуляции). В данной научно-исследовательской работе мы привели результаты для случая filtfilt на рисунке 5, а на рисунке 6 – для lfilter.



а – вид демодулированного сигнала с фильтром Баттерворта; б – вид демодулированного сигнала с фильтром Чебышева;

Рисунок 6 – Сигналы после демодуляции и фильтрации с использованием функции lfilter

Сравнительный анализ фильтрации проводился посредством вычисления среднеквадратичной ошибки (MSE) и максимальной ошибки между восстановленным сигналом и исходным прямоугольным импульсом. Полученные результаты показали, что оба фильтра – как Баттерворта, так и Чебышева – способны в достаточной мере выделить огибающую, однако фильтр Баттерворта продемонстрировал более гладкую амплитудно-частотную характеристику, что обеспечивает менее выраженные искажения формы импульса (рисунок 5, 6). Полученные значения ошибок:

- среднеквадратичная ошибка (MSE) для Баттерворта равна 0,129629;
- максимальная ошибка для Баттерворта равна 0,750481;
- среднеквадратичная ошибка (MSE) для Чебышева равна 0,156025;
- максимальная ошибка для Чебышева равна 0,778497.

Таким образом, выполненное исследование подтверждает, что выбранная схема модуляции и демодуляции является эффективной для задач выделения огибающей. Реализованный на Python код продемонстрировал возможность проведения комплексного анализа как во временной, так и в частотной областях, а также позволил оценить качество фильтрации с учётом влияния параметров фильтра.

Список использованных источников:

1. Смещение спектра сигнала [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/8761054/page:7/>. Дата доступа: 10.03.2024.
2. filtfilt — SciPy v1.15.2 Manual [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.filtfilt.html>. Дата доступа: 10.03.2024.

ANALYSIS OF MODULATION AND DEMODULATION PROCESSES IN TELECOMMUNICATION SYSTEM

Biyumen E.A., Makarenya E.A., students of gr.361401

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

Filchenkova T.M. – Senior Lecturer

Annotation. The analysis of modulation and demodulation processes in a telecommunication system is a study that examined the methods of formation, modulation and subsequent demodulation of a radio pulse in order to extract the original envelope of the signal. The work used a software implementation in the Python language, which allows modelling both the spectral transformation and the effects of various filters, which is critical for digital signal processing tasks in telecommunication systems.

Keywords. Amplitude modulation, demodulation, Python, signal spectrum, Chebyshev filter, Butterworth filter, fast Fourier transform.